

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Instytut Silników Spalinowych i Napędów

mgr inż. Barbara Sokolnicka-Popis

**Analiza ograniczenia emisji cząstek stałych z silników
o zapłonie iskrowym z wtryskiem bezpośrednim
za pomocą techniki filtracyjnej**

Rozprawa doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Fuć

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski

Poznań 2022

Spis treści

Streszczenie.....	4
Wykaz ważniejszych skrótów i symboli.....	6
1. Wprowadzenie	8
2. Emisja cząstek stałych z silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny	11
2.1. Przyczyny powstawania cząstek stałych w silnikach SI DI.....	11
2.2. Wybrane przepisy dotyczące emisji cząstek stałych z silników benzynowych ...	12
2.3. Metody badawcze oraz testy homologacyjne	14
3. Charakterystyka filtrów cząstek stałych do silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny.....	18
3.1. Budowa i zasada działania	18
3.2. Metody regeneracji filtrów cząstek stałych.....	21
4. Analiza warunków i parametrów eksploatacyjnych filtrów cząstek stałych.....	24
4.1. Parametry termodynamiczne gazów wylotowych	24
4.2. Analiza sposobów filtracji cząstek stałych	27
4.3. Analiza utleniania cząstek stałych	29
5. Analiza produkcji, eksploatacji i recyklingu nośników ceramicznych i metalowych	33
5.1. Wytwarzanie filtrów cząstek stałych	33
5.1.1. Z nośnikiem ceramicznym	33
5.1.2. Z nośnikiem metalowym	33
5.2. Odzysk metali szlachetnych z reaktorów katalitycznych i filtrów na świetle.....	35
5.2.1. Analiza rynku metali szlachetnych.....	35
5.2.2. Odzysk materiałów katalitycznych z nośników ceramicznych	37
5.2.3. Odzysk materiałów katalitycznych z nośników metalowych.....	40
5.3. Analiza możliwości ponownego wykorzystania materiałów tworzących nośnik	41
6. Cel i zakres pracy	43
7. Metodyka badań.....	46
7.1. Opis obiektów użytych do badań	46
7.2. Badania w warunkach rzeczywistych	51
7.3. Odwzorowanie testu rzeczywistego na hamowni silnikowej.....	55
8. Opracowanie prototypów nośników metalowych filtrów cząstek stałych	59
8.1. Badania symulacyjne różnych wariantów filtracyjnych nośników metalowych....	59

8.2. Zaprojektowanie wariantów nośników metalowych w oparciu o badania symulacyjne.....	70
9. Badania porównawcze i weryfikacyjne.....	73
9.1. Badania na hamowni dynamicznej w odwzorowanym teście rzeczywistym.....	73
9.1.1. Badania parametrów termodynamicznych	73
9.1.2. Badania emisji z użyciem komercyjnych nośników ceramicznych.....	76
9.1.3. Badania emisji z użyciem prototypowych nośników metalowych.....	82
9.2. Analiza wyników badań.....	91
10. Podsumowanie i wnioski	97
11. Kierunki dalszych prac	100
Literatura	101
Abstract.....	109

Streszczenie

Zwiększona emisja nanocząstek do atmosfery stanowi jeden z głównych problemów, na którym skupiają się organy legislacyjne odpowiedzialne za ograniczenie wpływu szkodliwych substancji ze źródeł motoryzacyjnych na środowisko. Według prognozy w 2025 r. silniki spalinowe zasilane paliwami konwencjonalnymi będą stanowić 85% wszystkich źródeł napędu. Popularność silników z bezpośrednim wtryskiem benzyny w ostatnich latach spowodowała zwiększenie zawartości cząstek stałych PM (*Particulate Matter*) o średnicach poniżej 100 nm w gazach wylotowych oraz środowisku naturalnym. Szczególnym zagrożeniem dla zdrowia człowieka jest emisja nanocząstek w obszarach miejskich, gdzie prawdopodobieństwo narażenia na bezpośredni kontakt z układem oddechowym człowieka jest największe. Badania przeprowadzone przez ośrodki naukowe na całym świecie potwierdzają działanie kancerogenne i negatywny wpływ PM na układy krążenia i oddechowy człowieka. Zwiększająca się świadomość ekologiczna użytkowników i producentów pojazdów wymaga zastosowania rozwiązań ograniczających emisję PM do atmosfery w zakresie zarówno masowym, jak i liczbowym. Wiąże się to bezpośrednio z celem realizowanej rozprawy doktorskiej, którym jest zaprojektowanie i wytworzenie filtra cząstek stałych z nośnikiem metalowym mogącym stanowić zamiennik dla filtrów z nośnikiem ceramicznym.

We wprowadzeniu wykazano zasadność badań nad rozwojem układów oczyszczania gazów wylotowych z uwagi na prognozę dominacji na światowym rynku pojazdów osobowych z silnikami spalinowymi, w tym głównie silnikami o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem SI DI (*Spark Ignition Direct Injection*). Pomimo ciągłego rozwoju elektromobilności, zużycie energii podczas jej wytwarzania oraz niewystarczający w tym udział energii odnawialnej stanowią argument potwierdzający konieczność doskonalenia konwencjonalnych napędów, w tym w obszarze pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych. Do 2025 r. silniki z bezpośrednim wtryskiem benzyny będą stanowić co najmniej 40% światowego rynku pojazdów osobowych. Duży udział tych jednostek w rynku wynika m.in. ze zmniejszonego zużycia paliwa, które jest jednym z głównych kryteriów wyboru z punktu widzenia konsumenta.

W części pracy dotyczącej emisji PM z silników SI DI opisano mechanizmy ich powstawania, obowiązujące przepisy ograniczające zawartość poszczególnych składników w gazach wylotowych oraz metody badawcze i testy homologacyjne. Następnie dokonano charakterystyki filtrów cząstek stałych z uwagi na ich budowę i zasadę działania, materiał, z których wykonano nośniki oraz metody regeneracji filtrów. Kolejny etap stanowiło porównanie warunków i parametrów eksploatacyjnych poszczególnych rodzajów filtrów oraz charakterystyka utleniania PM. Na podstawie analizy obecnego stanu zaawansowania procesów produkcji, utylizacji i recyklingu nośników ceramicznych i metalowych przedstawiono metody i skuteczność odzyskiwania metali szlachetnych z wyeksploatowanych filtrów cząstek stałych i reaktorów katalitycznych.

W rozdziale dotyczącym metodyki badań opisano autorską procedurę opracowaną w celu weryfikacji emisji w warunkach rzeczywistych. Następnie przedstawiono pojazdy samochodowe wykorzystane do rejestrowania parametrów służących do odwzorowania testu na dynamicznym stanowisku hamulcowym wyposażonym w jednostkę napędową o tożsamy parametrach technicznych. Scharakteryzowano także aparaturę pomiarową z wyszczególnieniem analizatorów wykorzystanych do określenia masy PM_m (*Particulate Matter Mass*) i liczby cząstek stałych PN (*Particulate Number*).

Na podstawie obliczeń numerycznych wykonanych w programie ANSYS, dla trzech wariantów nośników metalowych, dokonano analizy wpływu zastosowania perforacji jednej ze ścian na własności filtracyjne. Rozważaniom poddano prędkość przepływu gazów wylotowych, ciśnienie dynamiczne, absolutne i całkowite, rozkład energii kinetycznej turbulencji oraz stężenie PM w filtrze. W oparciu o wyniki przeprowadzonych symulacji wskazano wariant o największej skuteczności gromadzenia PM.

W rozdziale dotyczącym badań porównawczych i weryfikacyjnych dokonano analizy wyników otrzymanych dla dwóch rodzajów filtrów tj. OEM (*Original Equipment Manufacturer*) oraz prototypowych nośników metalowych skonstruowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej. Porównanie otrzymanych wartości emisji i natężenia emisji umożliwiło wskazanie najbardziej skutecznego rozwiązania i udowodnienie tezy wynikającej z głównego celu rozprawy doktorskiej.

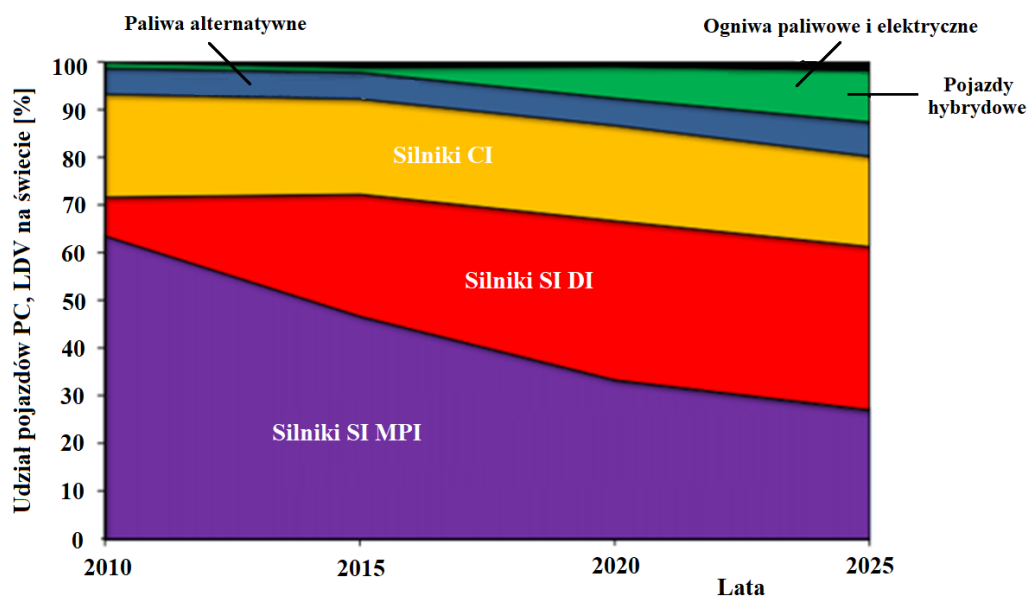
Wykaz ważniejszych skrótów i symboli

CF	– <i>Conformity Factor</i> – współczynnik zgodności emisji zanieczyszczeń
CFD	– <i>Computational Fluid Dynamics</i> – obliczeniowa mechanika płynów
CH ₄	– metan
CI	– <i>Compression Ignition</i> – zapłon samoczynny
CO	– <i>Carbon Monoxide</i> – tlenek węgla
CO ₂	– <i>Carbon Dioxide</i> – dwutlenek węgla
CPSI	– <i>Cells Per Square Inch</i> – liczba cel na cal kwadratowy
DI	– <i>Direct Injection</i> – wtrysk bezpośredni
DOC	– <i>Diesel Oxydation Catalyst</i> – utleniający reaktor katalityczny
D _p	– średnica cząstki stałej
DPF	– <i>Diesel Particulate Filter</i> – filtr cząstek stałych do silników CI
EGR	– <i>Exhaust Gas Recirculation</i> – układ recyrkulacji gazów wylotowych
EPA	– <i>Environment Protection Agency</i> – Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska
ESC	– <i>European Stationary Cycle</i> – europejski cykl jezdny w warunkach ustalonych
ETC	– <i>European Transient Cycle</i> – europejski cykl jezdny w warunkach nieustalonych
Euro	– normy emisji gazów wylotowych w Europie
FID	– <i>Flame Ionization Detector</i> – analizator płomieniowo-jonizacyjny
GPF	– <i>Gasoline Particulate Filter</i> – filtr cząstek stałych do silników SI
GPF/TWC	– filtr cząstek stałych pokryty katalitycznie
GPS	– <i>Global Positioning System</i> – globalny system pozycjonowania
HC	– <i>Hydrocarbons</i> – węglowodory
HDV	– <i>Heavy-Duty Vehicle</i> – pojazd ciężki
LCV	– <i>Light Commercial Vehicle</i> – lekkie pojazdy użytkowe
LDV	– <i>Light-Duty Vehicle</i> – pojazd lekki
MPI	– <i>Multi Point Injection</i> – wielopunktowy wtrysk paliwa
MSS	– <i>Micro Soot Sensor</i> – przyrząd do pomiaru stężenia cząstek stałych firmy AVL
NDIR	– <i>Non-Dispersive Infrared</i> – pomiar niedispersyjny wykorzystujący promieniowanie podczerwone
NDUV	– <i>Non-Dispersive Ultraviolet</i> – pomiar niedispersyjny wykorzystujący promieniowanie ultrafioletowe
NEDC	– <i>New European Driving Cycle</i> – nowy europejski cykl jezdny
NMHC	– <i>Non-Methane Hydrocarbons</i> – węglowodory niemetaanowe
NO	– <i>Nitrogen Oxide</i> – tlenek azotu
NO ₂	– <i>Nitrogen Dioxide</i> – dwutlenek azotu
NO _x	– <i>Nitrogen Oxides</i> – tlenki azotu

OBD	– <i>On-Board Diagnostics</i> – pokładowy system diagnozowania
OBD II	– <i>On-Board Diagnostics II</i> – pokładowy system diagnozowania drugiej generacji
OEM	– <i>Original Equipment Manufacturer</i> – wyposażenie producenta
OECD	– <i>Organization for Economic Co-operation and Development</i> – Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju
ON	– olej napędowy
PC	– <i>Passenger Car</i> – samochód osobowy
PEMS	– <i>Portable Emission Measurement System</i> – mobilne urządzenie do pomiarów emisji gazów wylotowych
PM	– <i>Particulate Matter</i> – cząstki stałe
PM _{2,5}	– cząstka stała o D _p <2,5 μm
PM _m	– <i>Particulate Matter Mass</i> – masa cząstek stałych
PN	– <i>Particulate Number</i> – liczba cząstek stałych
RDE	– <i>Real Driving Emissions</i> – rzeczywista emisja zanieczyszczeń w warunkach drogowych
SAE	– <i>Society of Automotive Engineers</i> – Stowarzyszenie Inżynierów Samochodowych w Stanach Zjednoczonych
SCR	– <i>Selective Catalyst Reduction</i> – selektywna katalityczna redukcja
SI	– <i>Spark Ignition</i> – zapłon iskrowy
SI DI	– silnik o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem
TGA	– <i>Thermogravimetric Analysis</i> – analiza termogravimetryczna
THC	– <i>Total Hydrocarbons</i> – suma węglowodorów
TSP	– <i>Total Suspended Particulate</i> – całkowity pył zawieszony
TWC	– <i>Three Way Catalyst</i> – trójfunkcyjny reaktor katalityczny
UFP	– <i>Ultrafine Particles</i> – cząstki ultradrobne
WLTC	– <i>Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycles</i> – ujednolicony światowy test dynamiczny
WLTP	– <i>Worldwide Light Duty Test Procedure</i> – ujednolicone procedury testów dla pojazdów lekkich
WHO	– <i>World Health Organization</i> – Światowa Organizacja Zdrowia
WHSC	– <i>World Harmonized Stationary Cycle</i> – światowy test statyczny dla normy Euro VI
WHTC	– <i>World Harmonized Transient Cycle</i> – światowy test dynamiczny dla normy Euro VI
WWA	– Wielopierscieniowe Węglowodory Aromatyczne
ZI	– zapłon iskrowy
ZS	– zapłon samoczynny

1. Wprowadzenie

Zanieczyszczenie środowiska przez sektor transportu stanowi nieodłączny aspekt postępu w motoryzacji. Pomimo stałego rozwoju ukierunkowanego na zwiększanie elektromobilności badania wykazały tendencję dominacji rynku pojazdów samochodowych z silnikami spalinowymi [86]. Pojazdy elektryczne, potocznie nazywane zeroemisyjnymi, w 90% przypadków napędzane są energią pochodzącą z nieodnawialnych źródeł energii [113]. Biorąc pod uwagę straty powstałe podczas wytwarzania energii (60%) oraz jej transportu (dodatkowe 20%), w najbliższych latach należy skupić się na doskonaleniu rozwiązań konstrukcyjnych silników spalinowych [86]. Obecnie w centrum uwagi konstruktorów silników jest między innymi jednostka zasilana bezpośrednim wtryskiem benzyny. Ten rodzaj zasilania posiada przewagę nad konkurencyjnymi rozwiązaniami, w takich aspektach jak mniejsze zużycie paliwa (mniejsza emisja CO₂), większy stopień sprężania (chłodzenie ładunku podczas dostarczania do komory spalania), zwiększenie precyzji uzyskania stosunku powietrza do paliwa w mieszance [13]. Według prognoz, do 2025 r., samochody z silnikami SI DI stanowiąc będą 40% pojazdów LDV na rynku światowym (rys. 1.1) [18].



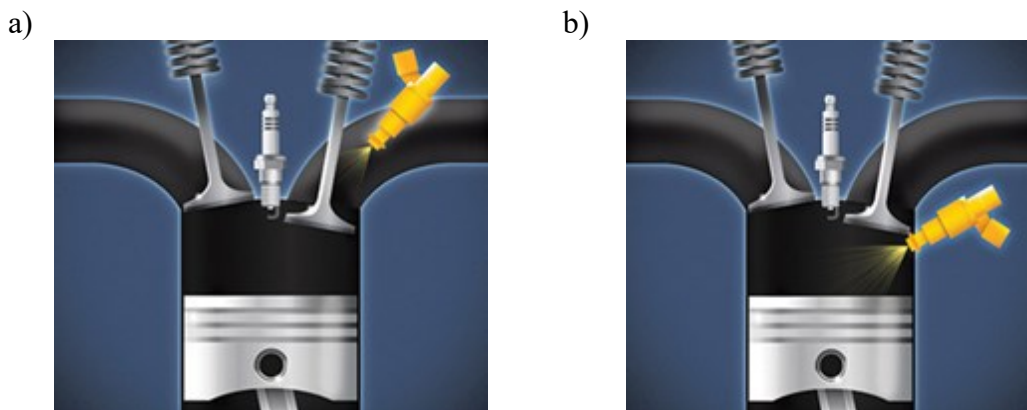
Rys. 1.1. Kierunek rozwoju zasilania pojazdów osobowych w latach 2010–2025 [18]

Zwiększenie ograniczeń światowych norm dotyczących emisji toksycznych i szkodliwych składników gazów wylotowych oraz nacisk na minimalizowanie zużycia nieodnawialnych źródeł energii spowodowały rozwój silników spalinowych, który ma na celu:

- zmniejszenie zużycia paliwa,
- redukcję emisji zanieczyszczeń i hałasu,
- zwiększenie sprawności,
- zwiększenie mocy jednostek napędowych przy obniżeniu lub zachowaniu objętości skokowej silników.

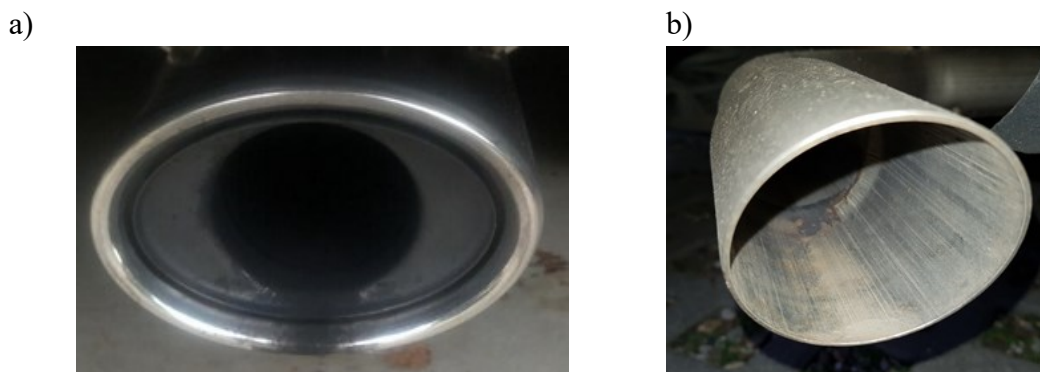
Jedno z głównych założeń konstrukcyjnych silnika z bezpośrednim wtryskiem benzyny dotyczy tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej w taki sposób, aby połączyć zalety silników o zapłonie samoczynnym CI (*Compression Ignition*) i iskrowym SI (*Spark Ignition*). Dotychczas stosowane silniki z wtryskiem wielopunktowym MPI (*Multi Point Injection*), dzięki tworzeniu mieszanki na zewnątrz cylindra, cechują

się dłuższym czasem przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej w porównaniu do wtrysku bezpośredniego, niezależnie od przemiany fazowej wewnątrz cylindra (rys. 1.2a) [10]. Pomimo tych aspektów, w kolektorze dolotowym tworzy się film ciekłego paliwa co prowadzi do zmniejszenia objętości mieszanki w stanie gazowym, w konsekwencji czego do komory spalania dostarczana jest mniejsza ilość paliwa [13, 105]. W silnikach SI dostosowanie masy czynnika roboczego (sumy mas doprowadzonego powietrza i paliwa) wymaganej do osiągnięcia określonej mocy odbywa się przez zmianę kąta nachylenia przepustnicy (dławienie przepływu). Pierwotnym założeniem silników SI DI było zubożenie mieszanki. Efekt dławienia nie występuje podczas częściowego obciążenia, co wpływa na zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa (do 30%) (rys. 1.2b) [75, 82, 107]. Kolejną zaletą bezpośredniego wtrysku paliwa jest zwiększenie stopnia sprężania. Zastosowanie chłodnicy powietrza doładowującego powoduje zwiększenie gęstości powietrza i tym samym zwiększenie stężenia tlenu, co ma bezpośredni wpływ na poprawę procesu spalania mieszanki paliwowo-powietrznej [70]. Ponadto dokładniejsze rozpylenie paliwa wtryskiwanego bezpośrednio do cylindra pod wysokim ciśnieniem zwiększa szybkość parowania, co skutkuje ograniczeniem emisji spowodowanej zimnym rozruchem silnika [71, 83].



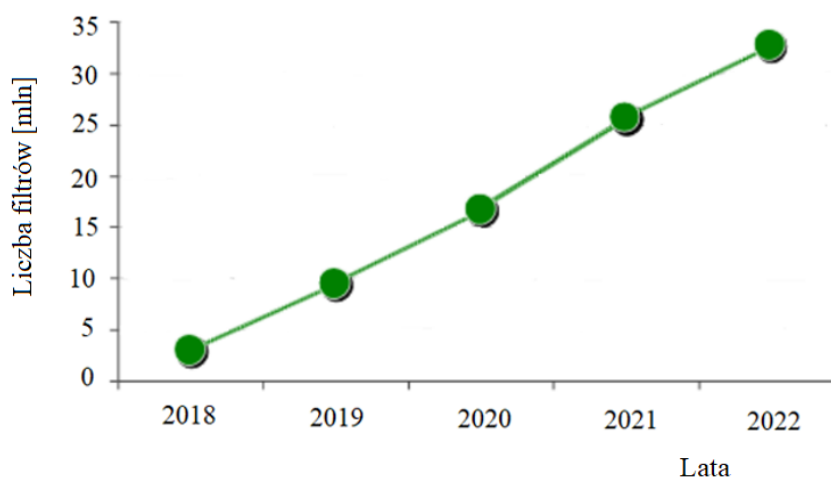
Rys. 1.2. Schemat wtrysku paliwa: a) wtrysk MPI, b) wtrysk bezpośredni SI DI [127]

Dopiero norma Euro 5 zawierała dane dotyczące ograniczenia PN. Obecnie wartość dopuszczalna PN wynosi $6 \cdot 10^{11}$ zarówno dla silników SI, jak i CI. Potwierdzenie konieczności ograniczenia emisji PM, także z silników benzynowych, widoczne jest bez przeprowadzenia specjalistycznych badań. Końcówka układu wylotowego nowoczesnego silnika SI DI jest wyraźnie zabrudzona, w porównaniu do silnika CI, wbrew obiegowej opinii (rys. 1.3). Emisja nanocząstek powoduje osadzanie się sadzy i pyłu, co świadczy o emisji z układu wylotowego dużej ilości substancji toksycznych zawartych w PM. Rozwiązaniem mającym na celu spełnienie wymagań dotyczących emisji PM z silników SI DI są filtry cząstek stałych GPF (*Gasoline Particulate Filter*). Technologia filtracji doskonała jest od lat 80-tych ubiegłego wieku. Nowe konstrukcje SI DI homologowane od września 2017 r. muszą być obligatoryjnie wyposażone w filtry cząstek stałych GPF [45, 74]. W kolejnym roku obowiązek wprowadzono także wobec starszych konstrukcji takich silników. Poza odpowiednią jakością filtracji, nośnik musi spełniać wymagania wytrzymałościowe (większe temperatury panujące w układzie wylotowym względem silników CI), posiadać odpowiednią pojemność magazynowania tlenu (w przypadku pokrycia katalitycznego nośnika filtra GPF/TWC) oraz wymiary dostosowane do pozostałych układów oczyszczania gazów wylotowych [58].



Rys. 1.3. Widok końcówki układu wylotowego nowoczesnego silnika:
a) SI DI, b) CI z układem DPF [108]

Poza odpowiednią jakością filtracji, nośnik musi spełniać wymagania wytrzymałościowe (wyższe temperatury panujące w układzie wylotowym względem silników CI), posiadać odpowiednią pojemność magazynowania tlenu (w przypadku pokrycia katalitycznego nośnika filtra GPF/TWC) oraz wymiary dostosowane do pozostałych układów oczyszczania gazów wylotowych [58]. Ze względu na konkurencyjność koncernów samochodowych, ważnym czynnikiem decydującym o wyborze producenta filtrów cząstek stałych jest koszt ich wytworzenia. Prognoza dotycząca liczby produkowanych filtrów cząstek stałych GPF sugeruje rocznie dziewięciokrotny wzrost ich liczby od 2017 r., w którym wprowadzono obowiązek montażu, do 2022 r. (rys. 1.4). Dostosowanie parametrów i własności fizykochemicznych filtrów do warunków panujących w układzie wylotowym silnika SI DI jest przedmiotem badań ośrodków naukowych na całym świecie.

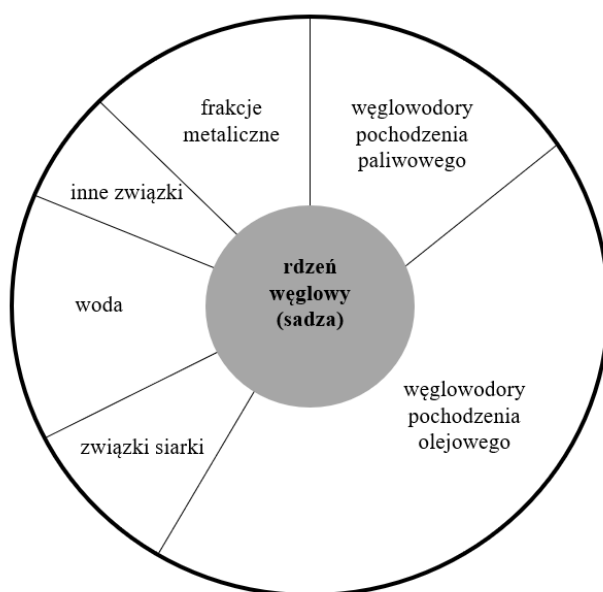


Rys. 1.4. Wzrost liczby GPF w milionach sztuk rocznie z prognozą do końca 2022 r. na świecie [126]

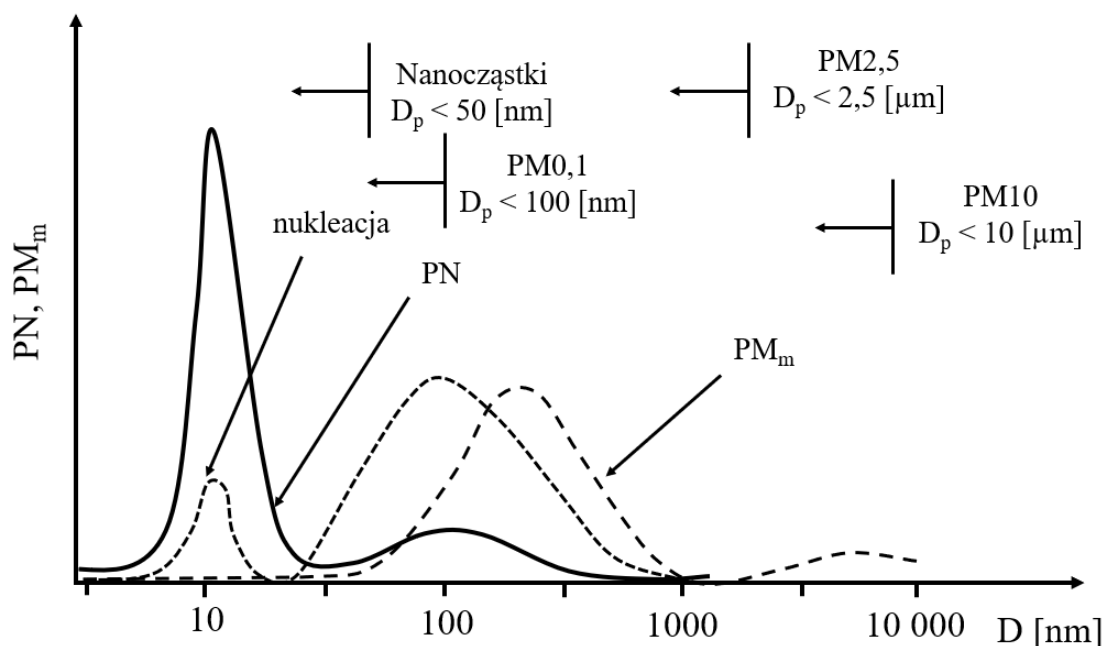
2. Emisja cząstek stałych z silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny

2.1. Przyczyny powstawania cząstek stałych w silnikach SI DI

PM to stałe lub ciekłe substancje wchodzące w skład gazów wylotowych, z wyjątkiem pary wodnej. Głównym kryterium podziału substancji tworzących PM jest kompozycja frakcyjna, która dzieli cząstkę na frakcję rozpuszczalną PM_SOF (*Soluble Organic Fraction*) i nierozpuszczalną PM_INSOL (*Insoluble Organic Fraction*) [37]. Sadza stanowiąca rdzeń PM powstaje w wyniku spalania paliwa o określonym składzie przy ograniczonym dostępie tlenu. Skład PM wynika z adsorpcyjnych właściwości powierzchni właściwej sadzy. Na powierzchni rdzenia następuje kondensacja związków pochodzących z paliwa i oleju smarującego, w tym związków azotu i siarki (<10 ppm), a także frakcji metalicznych (rys. 2.1) [69]. Bezpośredni wtrysk benzyny jest technologią preferowaną w obecnych konstrukcjach silników SI, jednak wyzwaniem stanowi spełnienie wymagań obecnych oraz przyszłych norm dotyczących PM_m oraz PN [29]. Zastosowanie bezpośredniego wtrysku benzyny przyczynia się do formowania PM o małych średnicach (poniżej 100 nm) (tab. 2.1). Cząstki UFP (*Ultra-fine Particles*), pomimo małej masy i średnicy, dominują pod względem liczby w otaczającym powietrzu. Największa wartość PN emitowanych z silników SI DI powstaje w wyniku nukleacji, która występuje w początkowej fazie rozpadu paliwa (rys. 2.2) [27]. Największe zagrożenie dla zdrowia stanowi docieranie UFP do pęcherzyków płucnych i brak możliwości ich filtrowania przez organizm ludzki ze względu na małe średnice [58]. Udowodniono znaczący wpływ zanieczyszczenia powietrza cząstkami o średnicach mniejszych niż 100 nm na występowanie chorób układu krążenia i układu oddechowego (w szczególności astmy i raka płuc) [6, 8, 54, 73, 103]. Problem ten jest znaczący, gdyż całkowita liczba kilometrów przejechanych w centrach miast przez pojazdy z silnikami SI przewyższa tę samą wartość dla silników CI, a tym samym emisja PM z tych pierwszych stanowi 68% wartości w ujęciu masowym i 90% ich liczby w stosunku do tych drugich [27].



Rys. 2.1. Uproszczony schemat budowy PM [46]



Rys. 2.2. Schematyczne przedstawienie mechanizmu formowania PM wraz z rozkładem wymiarowym [7]

Tabela 2.1. Podział PM ze względu na rozmiar i mechanizm powstawania [26, 74, 77]

Kryterium podziału	Podział PM	
Średnica	TSP	Pył zawieszony w zakresie 0,1 – 30 μm
	PM ₁₀	Duże cząstki o D _p < 10 μm
	PM _{2,5}	Małe cząstki o D _p < 2,5 μm
	UFP	Nanocząstki i ultradrobne cząstki o D _p < 100 nm

Do najważniejszych przyczyn powstawania PM w silnikach SI DI należą [55, 77, 104]:

- osadzanie kropeł paliwa na powierzchni cylindra dla $\lambda = 1,0$,
- niezupełne i niecałkowite spalanie spowodowane lokalnymi obszarami mieszanki bogatej,
- film ciekłego paliwa na powierzchni cylindra, w szczególności dla wtrysku typu *wall-guided* (stosowany dla uwarstwienia mieszanki),
- zaburzenia wtrysku paliwa, np. nieodpowiedni moment wtrysku, niedostateczne rozpylenie strugi, niewłaściwy kształt strumienia wtryskiwanego paliwa,
- właściwości fizykochemiczne wtryskiwanego paliwa: zawartość alkenów, naftalenu i WWA (Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne),
- stan cieplny silnika, zimny rozruch.

2.2. Wybrane przepisy dotyczące emisji cząstek stałych z silników benzynowych

Zdefiniowane kategorie pojazdów mają znaczenie dla konkurencyjności przemysłu motoryzacyjnego. Głównym celem kategoryzacji pojazdów jest przyporządkowanie ich do właściwych regulacji prawnych.

Do głównych kategorii pojazdów należą [84]:

- kategoria M: pojazdy przewożące pasażerów,
- kategoria N: pojazdy przewożące towary,
- kategoria L: pojazdy dwu- i trzykołowe oraz czterokołowe,
- kategoria T: ciągniki rolnicze i leśne oraz przyczepy.

Pojazdy z kategorii M lub N klasyfikowane są jako:

- lekkie pojazdy użytkowe – LDV (*Light Duty Vehicle*) – w skład tej kategorii zaliczają się zarówno samochody osobowe, jak i dostawcze,
- pojazdy ciężkie – HDV (*Heavy Duty Vehicle*) – potocznie samochody ciężarowe, autobusy i autokary.

Częstość zmiany przepisów ograniczających emisję składników gazów wylotowych dynamicznie wzrosła w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat. Świadomość społeczeństwa na temat szkodliwości ich wpływu na zdrowie człowieka i środowisko wymusza na organach legislacyjnych zaostrzanie obowiązujących norm (tab. 2.2). Istotę zmian stanowi głównie emisja PM zarówno dla silników SI, jak i CI. Dynamiczny rozwój jednostek SI DI spowodował wprowadzenie wartości dopuszczalnych dla PM w ujęciu liczbowym (ponieważ w tych właśnie silnikach PN ma największe znaczenie). Dominacja w rynku takich silników rozpoczęła się przed wprowadzeniem ograniczeń emisji PN we wrześniu 2017 r. [79, 95]. Dotychczas ośrodki badawcze skupione były jedynie na PM_m, jednak badania dowiodły zasadność wprowadzenia ich osobnej klasyfikacji. Ograniczenie emisji toksycznych i szkodliwych składników gazów wylotowych, poza aspektem zmniejszenia szkodliwości dla środowiska, wiąże się także z koniecznością rozwoju pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych.

Tabela 2.2. Wartości dopuszczalne składników gazów wylotowych dla silników SI [97]

Składnik	Jednostka	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d
THC	mg/km	100	100	100
NMHC		68	68	68
NO _x		60	60	60
CO		1000	1000	1000
PM		5,0	4,5	4,5
PN	–/km	–	–	6·10 ¹¹

W marcu 2020 r. Komisja Europejska przedstawiła plan ewaluacji przepisów dotyczących emisji spalin po Euro 6. Kolejna norma będzie nosić nazwę Euro 7. Według NGVA Europe (*The Natural & Bio Gas Vehicle Association*), wszelkie przyszłe normy powinny zostać opracowane po dokładnej analizie i ocenie obowiązujących norm Euro 6 i uzupełnieniu o podejście systemowe (wykorzystanie zarządzania ruchem, łączności i modeli mobilności, które charakteryzują aktywność społeczeństwa z wykorzystaniem środków transportu) [119]. Stowarzyszenie AECC (*Association for Emissions Control by Catalyst*) sugeruje, aby stanowiła ona podsumowanie dotychczasowych działań oraz skupienie się na następujących kwestiach [80]:

- normy emisji neutralne dla technologii i paliwa – jednakowe procedury i ograniczenia powinny mieć zastosowanie do każdego typu układu napędowego, niezależnie od rodzaju silnika: SI, CI – wtrysk pośredni czy bezpośredni, paliwa: olej napędowy, benzyna, CNG (*Compressed Natural Gas*),

LNG (*Liquefied Natural Gas*) i poziomu elektryfikacji (*plug-in hybrid, mild-hybrid, full hybrid*);

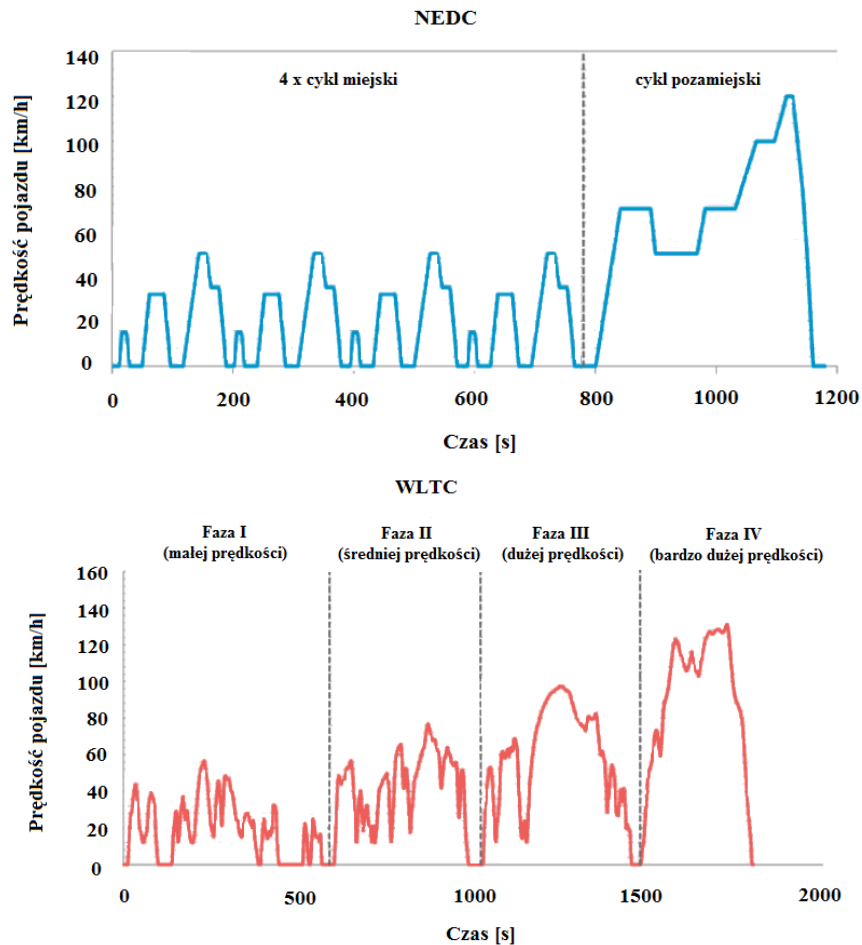
- dalszy rozwój badań rzeczywistej emisji – rozwój procedury RDE (*Real Driving Emissions*) dla lekkich samochodów osobowych i dostawczych spełniających normę Euro 6d, połączenie wartości maksymalnych oraz średniego poziomu emisji, w celu zapewnienia ochrony przed występowaniem lokalnych zanieczyszczeń na obszarach miejskich i mieszkalnych (np. spowodowanych regeneracją filtrów cząstek stałych),
- systemowe podejście do cyklu życia pojazdu LCA (*Life Cycle Assessment*) – spójne wymagania od procesu produkcyjnego do zakończenia eksploatacji pojazdu, definicja cyklu życia pojazdu jako kryterium projektowe, bardziej rygorystyczne kontrole układów oczyszczania gazów wylotowych oraz przepisy dotyczące pojazdów, które przekraczają dopuszczalne wartości emisji.

2.3. Metody badawcze oraz testy homologacyjne

Kategorie pojazdów stanowią podstawę funkcjonowania systemu homologacji pojazdów. Europejska Komisja Gospodarcza ONZ UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) przyczyniła się do ogólnoświatowego ujednoczenia technicznego w kontekście badań emisji z pojazdów, jednak na terenie Unii Europejskiej przewagę stanowią procedury homologacji będące częścią rynku wewnętrznego. Badania homologacyjne w aspekcie emisji charakteryzują się stosunkowo długim czasem trwania, rzędu 20–30 min, na który składają się zmiany obciążenia i prędkości obrotowej wału korbowego mające charakteryzować różne warunki eksploatacji w tym zimny i gorący rozruch silnika [43].

Cykl ECE+EUUDC (*Economic Commission for Europe + Extra Urban Driving Cycle*) stosowano powszechnie od początku lat 90-tych. Celem organów legislacyjnych było stworzenie testu umożliwiającego certyfikację emisji gazów wylotowych z samochodów osobowych oraz LCV (*Light Commercial Vehicle*) w powtarzalny sposób. Badanie przebiega w ściśle określonych warunkach otoczenia (temperatura i wilgotność) z wykorzystaniem hamowni podwoziowej. Średnia prędkość w teście wynosi 33 km/h, a przez 25% czasu trwania cyklu pojazd jest zatrzymany. Kolejną edycją tego testu, obowiązującą od stycznia 2000 r. był NEDC (*New European Driving Cycle*) wykorzystujący niewielki udział dostępnej mocy i pokrywający część możliwych rzeczywistych warunków eksploatacji (rys. 2.3) [42, 81]. Aby sprostać wymaganiom związanym z rozwojem silników spalinowych opracowano procedurę badawczą WLTC+RDE (*Worldwide Light Duty Test Cycle + Real Driving Emission*) wprowadzoną we wrześniu 2017 r. Głównym celem opracowania tego testu było wypełnienie luki pomiędzy nieadekwatnym do rozwoju silników testem NEDC, a badaniami w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Emisja CO₂ w teście NEDC jest do 25% mniejsza niż w przypadku WLTC [76]. Wartość spełniała wymagania obowiązujących norm, ale była kolejnym dowodem na konieczność wycofania testu NEDC, ponieważ rzeczywista wartość emisji była znacząco zaniżona. Test WLTC składa się z zestawu cykli z prędkościami pojazdu zależnymi od stosunku mocy silnika do masy pojazdu PMR (*Power Mass Ratio*). Większość pojazdów badanych na terenie Europy charakteryzuje się współczynnikiem PMR > 34 kW/t, dla którego przebieg testu przedstawiono na rys. 2.3 [31, 42]. Pojazd w teście WLTC badany jest dłużej i pokonuje ponad dwukrotny dystans w porównaniu do testu NEDC (tab. 2.3). Czynnikiem warunkującym istotę wprowadzenia procedury WLTP są: większa moc i średnia prędkość pojazdu, większy wpływ stylu jazdy kierowcy na eksploatację,

dokładniejsze warunki badań, skrócenie czasu zatrzymania i zwiększenie dynamiki przyspieszania i hamowania (tab. 2.3) [128].



Rys. 2.3. Porównanie przebiegu prędkości pojazdu w testach: a) NEDC; b) WLTC [31]

Tabela 2.3. Porównanie testów NEDC i WLTC [76]

Cykl jezdny	NEDC	WLTC
Czas trwania testu	1180 s	1800 s
Średnia prędkość	34 km/h	47 km/h
Maksymalna prędkość	120 km/h	131 km/h
Dystans	11 km	23,25 km
Wpływ wyposażenia pojazdu	Nie uwzględniono wpływu wyposażenia na emisję CO ₂	Analiza wpływu czynników powodujących zwiększenie zużycia paliwa w zależności od modelu pojazdu
Temperatura podczas testu	20–30°C	23°C
Wykorzystanie przekładni	Stałe punkty zmiany biegów	Zmienne punkty zmiany biegów dla każdego pojazdu

Wymagania dotyczące wiarygodności badań homologacyjnych zwiększają się w wyniku zaostrzania przepisów dotyczących emisji CO₂ i zawartości toksycznych składników gazów wylotowych. Powtarzalność i możliwość porównania wyników testów laboratoryjnych przez wiele lat była ich zaletą, jednak konieczność określenia

wpływu rzeczywistych warunków ruchu drogowego na uzyskane wartości emisji doprowadziła do powstania procedury badawczej RDE [44, 48]. Procedura RDE określa wymagania dotyczące aparatury, metod oceny wyników badań oraz granice dopuszczalnych warunków testu. Aktualizacja wytycznych badań RDE odbywała się w czterech etapach. Pierwszy, ogłoszony w maju 2015 r. zawiera wytyczne procedury testowej RDE. Drugi etap określa współczynniki zgodności CF (*Conformity Factor*) dla NO_x (tlenki azotu). W trzecim etapie dodano wyboru współczynnika zgodności dla PN, uwzględniono emisję w RDE przy zimnym rozruchu silnika, przystosowano procedurę RDE dla pojazdów z napędami hybrydowymi, uwzględniono regenerację filtra cząstek stałych do oceny emisji. W maju 2018 r. Komisja Europejska przyjęła czwarty pakiet obniżający zakres błędu CF dla NO_x z 0,5 do 0,43. Uwzględniono także nadzór rynku i firm zewnętrznych, które w większości odpowiedzialne są za przeprowadzenie badań homologacyjnych [69, 70]. Ustalona we wrześniu 2017 r. nieprzekraczalna wartość emisji NTE (*Not-to-Exceed*) w teście RDE dla nowych modeli samochodów określana jest przy użyciu CF. Wartość CF dla NO_x wynosi 2,1 i obowiązuje w przypadku wszystkich nowych pojazdów od września 2019 r. Wraz z normą Euro 6d-temp wprowadzono CF dla PN – 1,5 przy zakresie błędu $1,0 \pm 0,5$. Oznacza to, że pojazd homologowany zgodnie z normą Euro 6d-temp w teście WLTC może emitować 1,5 razy więcej PN podczas badań RDE. Dla normy Euro 6d CF stanowi zakres niepewności urządzeń pomiarowych PEMS (*Portable Emission Measurement System*). Ustawodawstwo UE przewiduje możliwość corocznej rewizji CF, który Komisja Europejska ustaliła obecnie na 50% [81]. W celu zapewnienia wiarygodności przeprowadzonych pomiarów przejazd musi spełnić wymagania określone w specyfikacji testu (tab. 2.4).

Tabela. 2.4. Specyfikacja testu dla poszczególnych etapów testu RDE [44]

Parametr	Wymagania
Dystans – odpowiednio cykl miejski, pozamiejski i autostradowy (M/P/A)	34%, 33%, 33% ± 10% (udział części miejskiej więcej niż 29%)
Definicja cyklu M/P/A na podstawie przedziału prędkości pojazdu	Miejski: prędkość pojazdu $V \leq 60$ km/h; średnia prędkość 15–40 km/h; kilka okresów zatrzymania trwających 10 s lub dłużej
	Pozamiejski: prędkość pojazdu $60 < V \leq 90$ km/h
	Autostradowy: prędkość pojazdu $V > 90$ km/h; $V > 100$ km/h przez min. 5 min
Dystans w cyklu M/P/A	Min. 16 km
Maksymalna prędkość pojazdu	$V \leq 145$ km/h (dopuszczalne przekroczenie o 15 km/h nie dłużej niż 3% czasu trwania cyklu autostradowego)
Czas trwania przejazdu	Pomiędzy 90 a 120 min
Pozostałe wymagania	Różnica między początkowym i końcowym punktem testu nie większa niż 100 m n.p.m.
	Test przeprowadzony w dniu roboczym w godzinach pracy
	Okres zatrzymania: 6–30% czasu trwania cyklu miejskiego
	Maksymalna możliwa ciągłość dla cyklu M/P/A

Przebieg badania RDE określono w sześciu etapach: wybór pojazdu, przygotowanie pojazdu, opracowanie trasy, wykonanie przejazdu, weryfikacja przejazdu i obliczenie emisji [44]. Badanie zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego odbywa się przy użyciu aparatury z grupy PEMS. Mobilne przyrządy umożliwiają

określenie wszystkich limitowanych składników gazów wylotowych, takich jak: CO (tlenek węgla), HC (węglowodory), NO_x (NO+NO₂), CO₂, PM i PN. Konkurencyjność rynku producentów PEMS prowadzi do coraz większej miniaturyzacji tej aparatury (przez zmniejszenie masy urządzeń z 200 do 70 kg) [81].

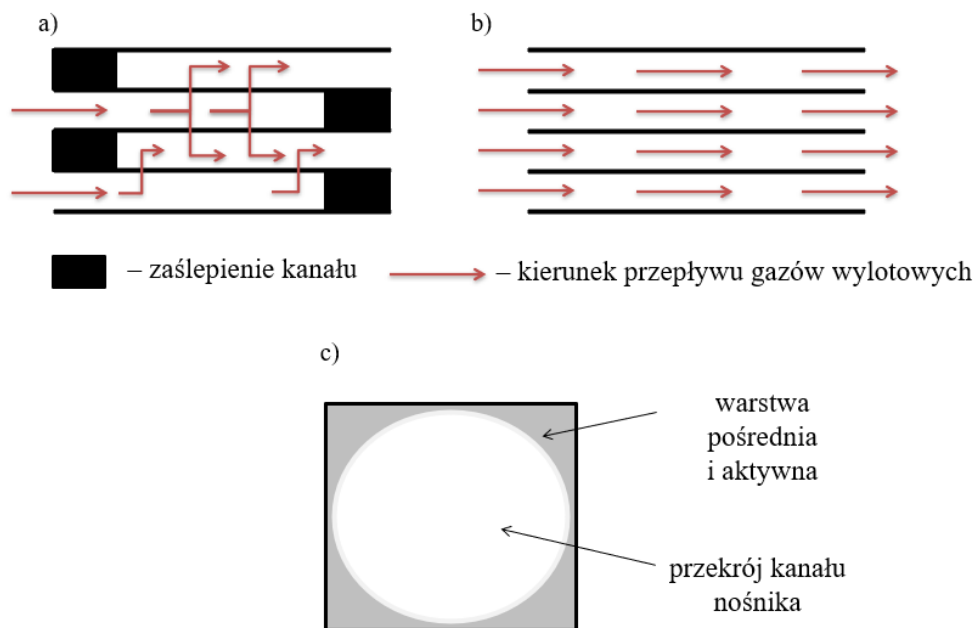
Najważniejsze założenia procedury RDE [81]:

- badanie wykonywane jest w rzeczywistych warunkach ruchu na drogach publicznych (warunki reprezentatywne dla poruszania się po drogach europejskich),
- wyniki badań muszą być publicznie dostępne,
- producent określa grupę pojazdów, dla której wykonywane jest badanie; kryteria doboru odnoszą się do konfiguracji układu oczyszczania gazów wylotowych,
- zaleca się wykonanie testu walidacyjnego na hamowni podwoziowej, w celu wykluczenia wpływu ewentualnych usterek przyrządów PEMS użytych do badań.

3. Charakterystyka filtrów cząstek stałych do silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny

3.1. Budowa i zasada działania

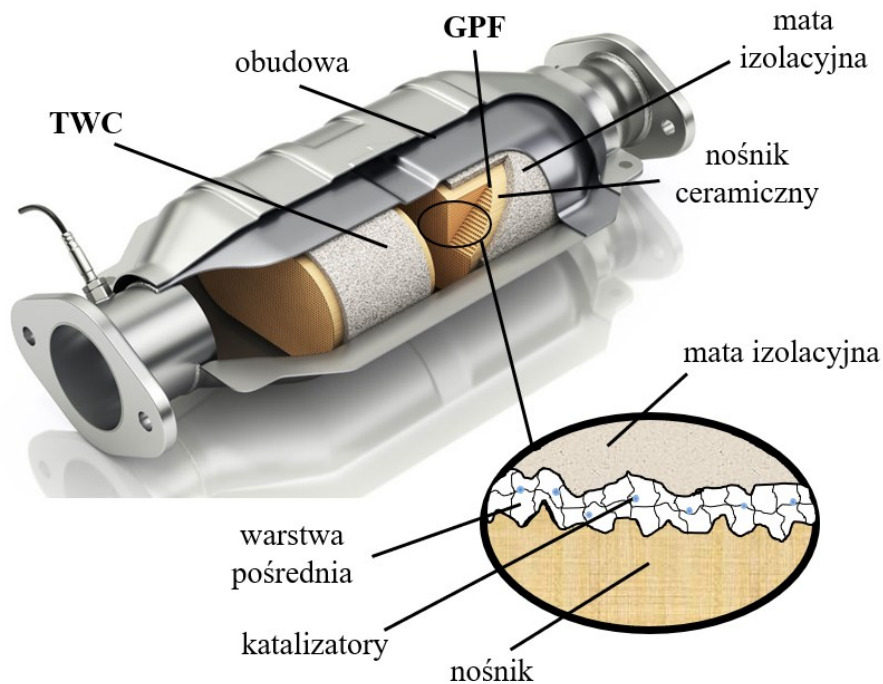
Filtr przeznaczony jest do przechwytywania PM i popiołu powstałych jako skutek uboczny spalania paliwa oraz utleniania cząstek w samym filtrze. Najpopularniejszym wariantem stosowanym w pojazdach osobowych jest filtr z nośnikiem ceramicznym w metalowej obudowie. W takim przypadku nośnik zbudowany jest z równoległe rozmieszczonych kanałów dolotowych i wylotowych naprzemiennie zaślepionych wymuszając przepływ gazów wylotowych przez porowatą ściankę oddzielającą kanały (przepływ określany z ang. *wall-flow*). Nośniki ceramiczne wykonywane są w dwóch technologiach: *wall-flow* używane do filtrów cząstek stałych (rys. 3.1a) oraz *flow-through* stosowane do reaktorów katalitycznych TWC (*Three Way Catalyst*), DOC (*Diesel Oxydation Catalyst*), SCR (*Selective Catalyst Reduction*). (rys. 3.1b). Przekrój kanału nośnika jest kwadratowy, a po naniesieniu warstw pośredniej i aktywnej obiera przekrój owalny, (rys. 3.1c).



Rys. 3.1. Przepływ gazów wylotowych przez nośniki ceramiczne o różnej konstrukcji i zastosowaniu oraz przekrój kanału z warstwami katalitycznymi: a) nośnik typu *wall-flow* stosowany do filtrów cząstek stałych, b) nośnik typu *flow-through* stosowany do budowy reaktorów TWC, DOC, SCR, c) przekrój kanału nośnika z warstwami pośrednią i aktywną

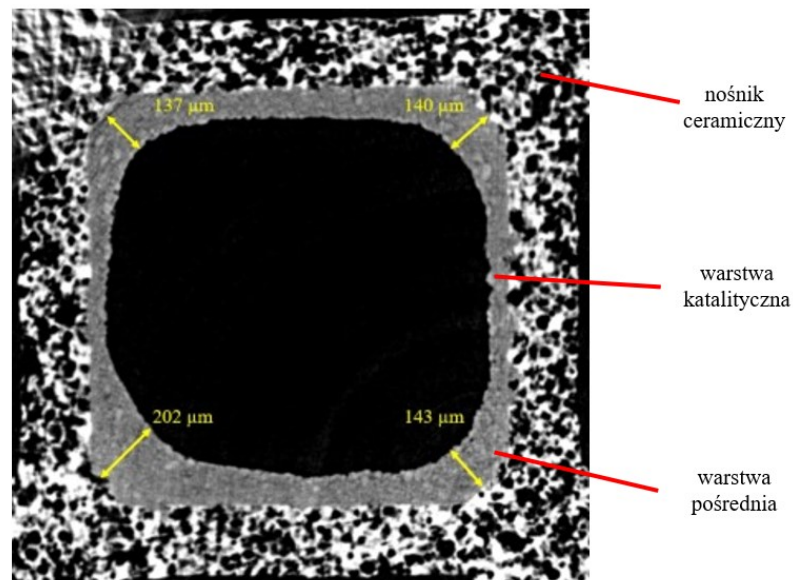
Filtr cząstek stałych stosowany w pojazdach samochodowych składa się z pięciu głównych elementów (rys. 3.2):

- obudowy,
- maty izolacyjnej,
- nośnika (ceramiczny lub zwinięte folie metalowe),
- warstwa pośrednia naniesiona na nośnik umożliwiającą zwiększenie jego powierzchni,
- warstwa aktywna – katalizator (głównie platyna Pt, pallad Pd i/lub rod Rh, stosowane są również katalizatory tlenkowe).



Rys. 3.2. Budowa układu oczyszczania gazów wylotowych w konfiguracji TWC+GPF[120]

Nośnik filtra cząstek stałych budową przypomina rozwiązania stosowane w reaktorach katalitycznych (struktura plastra miodu), jednak pole powierzchni wlotu jest mniejsze, a ścianki zaślepionych kanałów mają strukturę porowatą. Całkowita porowatość materiału nośnika mieści się w granicach 45–50%. Średni rozmiar poszczególnych porów to 10–20 nm. Niezależnie od zastosowanego materiału nośnika wnętrza kanałów dolotowych i wylotowych filtrów cząstek stałych pokryte są często warstwami pośrednią i katalityczną (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Warstwa pośrednia i katalityczna na ceramicznym nośniku wykonanym z kordierytu [11]

Sposób naniesienia katalizatora wpływa na właściwości użytkowe filtra i sprawność filtracji. Najnowsze badania nad zdyspergowaniem katalizatora na powierzchni kanałów

wykorzystują tomografię rentgenowską (komputerową). Na podstawie tych pomiarów następuje przekształcenie obrazu 3D w domenę obliczeniową służącą do symulacji dyfuzji, przepływu, zachodzących reakcji i mechanizmów filtracji [11]. Głównym przeznaczeniem warstwy pośredniej jest zapewnienie podłoża dla wybranych metali szlachetnych (warstwy katalitycznej) oraz zwiększenie powierzchni kontaktu gazów wylotowych z katalizatorami. Warstwa ta wytwarzana jest z nieorganicznych tlenków metali, takich jak Al_2O_3 , CeO_2 , ZrO_2 , TiO_2 i zeolitów w składach, i udziałach wagowych zapewniających stabilność termiczną oraz przyczepność do materiału nośnika [5, 96]. Najczęściej stosowanymi katalizatorami są metale szlachetne z grupy platynowców PGM (*Precious Group Metals*) [100].

Spotykane są rozwiązania nośników metalowych stosowanych do budowy filtrów cząstek stałych, jednak dotyczy to układów wylotowych silników pojazdów HDV, a ich budowa jest znacząco odmienna od klasycznych rozwiązań nośników ceramicznych, co utrudnia ich zastosowanie w pojazdach osobowych. Prace producentów i konstruktorów z ośrodków badawczo-rozwojowych na całym świecie ukierunkowane są na połączenie zalet nośników metalowych i ceramicznych (tab. 3.1).

Tabela 3.1. Wady i zalety nośników metalowych i ceramicznych w filtrach cząstek stałych [40]

Rodzaj nośnika	Zalety	Wady
Metalowy	<ul style="list-style-type: none"> – wytrzymałość na duże temperatury, – łatwość wykonania elementów o dużej średnicy, – odporność na gwałtowne zmiany temperatury, – krótki czas osiągnięcia temperatury <i>light-off</i>, – większa powierzchnia GSA w porównaniu do elementów o podobnej liczbie CPSI (<i>Cells per Square Inch</i>) nośnika ceramicznego. 	<ul style="list-style-type: none"> – duży koszt wytworzenia, – utrata ciepła podczas pracy silnika na obciążeniach częściowych, – obniżenie wytrzymałości mechanicznej w wyniku lutowania i spawania, – możliwość wystąpienia korozji przy dużej temperaturze.
Ceramiczny	<ul style="list-style-type: none"> – ograniczenie strat ciepła, – mniejszy koszt wytworzenia, – mała masa nośnika, – powtarzalność kształtu kanałów nośnika. 	<ul style="list-style-type: none"> – duża bezwładność termiczna, – mniejsza wytrzymałość na uszkodzenia mechaniczne, – duże opory przepływu dla dużej liczby CPSI.

Do podstawowych parametrów nośnika filtra cząstek stałych należą [114]:

- powierzchnia GSA (*Geometric Surface Area*) [cm^2/cm^3],
- powierzchnia wlotu gazów wylotowych OFA (*Open Frontal Area*) [%],
- współczynnik sprawności konwersji LOF (*Light-Off* 50%) [m^{-2}], jeśli filtr pełni również funkcję reaktora katalitycznego,
- średnica hydrauliczna D_h [mm],

- powierzchnia wlotu gazów wylotowych z uwzględnieniem warstwy pośredniej OFA_c, jeśli filtr pełni również funkcję reaktora katalitycznego,
- stopień wypełnienia δ [%], jeśli filtr pełni również funkcję reaktora katalitycznego,
- bezwładność cieplna M [J/(kg·K)].

Pracę filtra cząstek stałych z nośnikiem ceramicznym w silnikach SI można podzielić na trzy etapy:

- etap I – przepływ gazów wylotowych przez porowate ścianki nośnika oddzielające kanały. Następuje częściowe zatrzymanie PM i/lub utlenianie jeśli temperatura ścianek/porów nośnika ma temperaturę umożliwiającą ich utlenienie (ok. 600°C). Początkowy etap charakteryzuje się mniejszą skutecznością filtracji,
- etap II – akumulacja PM wzdłuż wewnętrznej ściany kanału. Po wypełnieniu części porów w ściankach nośnika PM działają jak materiał filtrujący, co powoduje zwiększenie wydajności filtracji, ale wiąże się z przyrostem ciśnienia wewnątrz filtra na skutek akumulacji cząstek i przyrostem ciśnienia wstecznego,
- etap III – dalsza akumulacja PM na ściankach wewnętrznych kanału oraz wewnątrz porów otwartych. Przy dostatecznie dużej temperaturze i wystarczającym stężeniu O₂ następuje utlenianie cząstek regenerujące filtr. Popiół nie ulega utlenianiu i stopniowo wypełnia kanał wlotowy nośnika obniżając sprawność filtracji i skracając czas między regeneracjami.

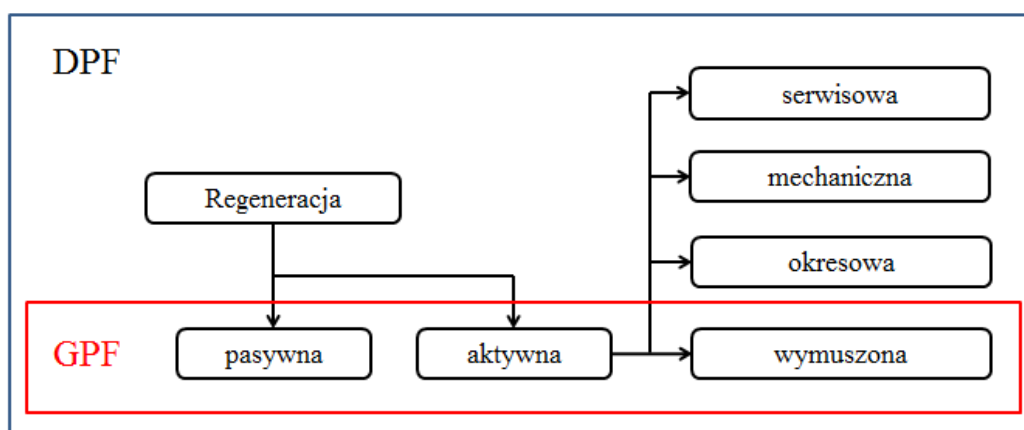
3.2. Metody regeneracji filtrów cząstek stałych

Niezależnie od rodzaju wykorzystywanego paliwa i materiału, z którego wykonany jest nośnik filtra cząstek stałych, koniecznym warunkiem odpowiedniej eksploatacji jest regeneracja filtra. Nie istnieje rozwiązanie, które zapewniłoby filtrację bez stopniowego gromadzenia PM w nośniku. Szybkość akumulacji zależy od eksploatacji pojazdu. W przypadku wykorzystywania pojazdu na krótkich dystansach w obszarach miejskich prawdopodobieństwo zapełnienia filtra jest dużo większe, niż podczas jazdy w warunkach autostradowych, która sprzyja większej temperaturze w układzie wylotowym. Liczba metod regeneracji, podczas codziennej eksploatacji, pomiędzy filtrami GPF i DPF różni się. W przypadku filtrów DPF, rozróżnia się regenerację pasywną i aktywną. W filtrze GPF występuje regeneracja pasywna, a mechanizm związany jest ze zmniejszeniem objętości paliwa wtryskiwanego do komory spalania, co jest konieczne celem zapewnieniem warunków utleniających. W przypadku obu filtrów istnieją procedury regeneracji aktywnej–serwisowej. Dla filtra DPF regenerację aktywną, w zależności od sposobu jej uruchomienia, można jeszcze podzielić na okresową (parametry jej aktywacji są zdefiniowane przez producenta) oraz wymuszoną przez kierowcę lub też chwilowymi warunkami eksploatacji pojazdu (rys. 3.4). Regeneracja aktywna zachodzi przy współdziałaniu układu czujników, które służą do pomiaru parametrów eksploatacyjnych filtra. Kontrolowanie filtra cząstek stałych w silnikach SI i CI odbywa się z pomocą [4, 112, 124]:

- czujników różnicy ciśnienia – istnieją dwa rodzaje, pierwszy z nich dokonuje pomiaru ciśnienia przed filtrem i porównuje do wartości wzorcowej zapisanej w sterowniku silnika. W drugim przypadku czujnik połączony jest z układem wylotowym przewodem przed i za filtrem, co pozwala na odczytanie różnicy ciśnień i określenia stopnia wypełnienia filtra cząstkami stałymi. W czujnikach tensometrycznych różnica ciśnienia powoduje odkształcenie membrany i wysłanie sygnału napięciowego do wzmacniacza, a następnie przekazanie do

systemu OBD (*On-Board Diagnostics*). Stopień akumulacji cząstek określany jest na podstawie oporów przepływu strumienia gazów przez filtr,

- czujników temperatury gazów wylotowych – zapewnia kontrolę temperatury podczas regeneracji filtra. W układzie wylotowym występuje od jednego do czterech czujników (termistorów). W większości przypadków montowane są dwa czujniki, przed i za filtrem. W przypadku uszkodzenia jednego z nich nie ma możliwości przeprowadzenia regeneracji aktywnej,
- czujników PM – obecnie wykorzystywane technologie bazują na pomiarze rezystancji. Cząstki stałe osiadają na powierzchni elektrody tworząc warstwę cząstek pomiędzy elektrodami. Przed każdym cyklem pomiarowym czujnik podlega regeneracji przez ogrzewanie, co powoduje przyjęcie określonego stanu wyjściowego,
- czujników O₂ – określa ilość O₂ w układzie wylotowym i przekazuje sygnał do jednostki sterującej silnika ECU (*Engine Control Unit*). Przed filtrem znajduje się jeden z czujników, który odpowiada za sygnał, na podstawie którego następuje zmiana dawki paliwa. Drugi czujnik umieszczony jest wewnątrz lub za filtrem w celu weryfikacji poprawności działania elementu układu oczyszczania gazów wylotowych.



Rys. 3.4. Strategie regeneracji filtrów cząstek stałych

Regeneracja pasywna

Regeneracja pasywna filtra DPF odbywa się, gdy gazy wylotowe osiągają temperaturę 200–500°C. Proces zachodzi bez ingerencji kierowcy. Część nierozpuszczalna PM wchodzi w reakcję z warstwą aktywną, jak również często pośrednią, w nowoczesnych rozwiązaniach (proces ten zależy od lokalnej temperatury gazów wylotowych i nośnika). Węgiel zawarty w cząstkach reaguje z NO₂ zawartym w gazach wylotowych, wskutek czego powstaje CO i NO. W wyniku połączenia z O₂ do atmosfery wydostaje się CO₂ i N₂ (azot) [21]. Z uwagi na większą temperaturę w układzie wylotowym silnika SI, niż CI, regeneracja pasywna jest główną metodą stosowaną w filtrach GPF. Silniki SI DI przez większość czasu pracują na mieszance stechiometrycznej, co skutkuje wysoką temperaturą gazów wylotowych, w których stężenie O₂ jest małe. Jednak podczas jazdy w określonych warunkach jednostka sterująca odcina dopływ paliwa podczas redukcji prędkości przez pojazd, co powoduje zwiększenie stężenia O₂ w przepływających przez filtr gazach wylotowych i tym samym umożliwia regenerację pasywną [2].

Regeneracja aktywna

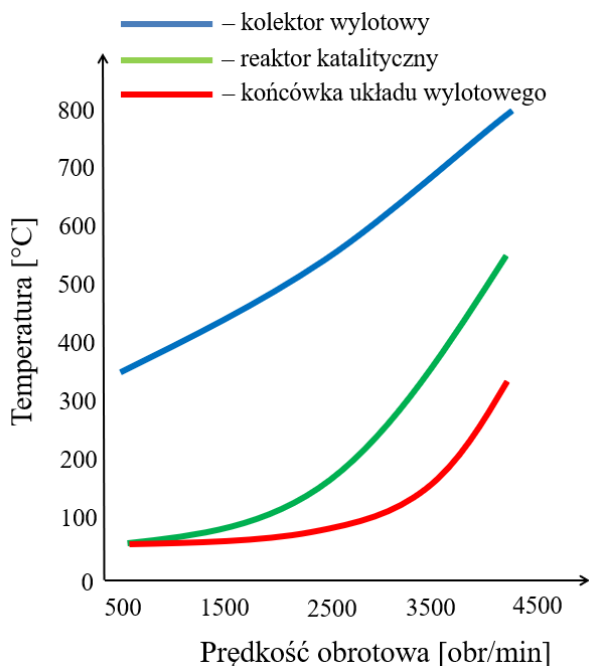
Kiedy eksploatacja pojazdu charakteryzuje się małą prędkością przez długi czas, może wystąpić konieczność aktywnej regeneracji. Wymaga to zwiększenia temperatury gazów wylotowych, a następnie nośnika do około 600°C, aby umożliwić zajście reakcji utleniania PM. W przypadku silników CI regeneracja aktywna polega na wtrysnięciu dodatkowej dawki paliwa w fazie rozprężania, co powoduje wzrost temperatury gazów wylotowych w zakresie 350–600°C. Następnie gazy wylotowe trafiają do filtra, gdzie następuje katalityczne i niekatalityczne utlenianie węglowodorów i PM [92]. W silnikach CI regeneracja aktywna możliwa jest przez wtrysk dodatkowego paliwa, a ponieważ zasada zasilania silników SI opiera się na sterowaniu położeniem przepustnicy, konieczne było opracowanie odpowiednich rozwiązań [88]. Dotychczas opracowano dwa sposoby osiągnięcia wymaganej temperatury w układach wylotowych silników SI. Pierwszy z nich zakłada opóźnienie zapłonu, drugi modulację stosunku powietrza do paliwa w mieszance [94]. Zaletą opóźnienia zapłonu jest brak zmiany współczynnika nadmiaru powietrza, a tym samym brak wpływu na sprawność trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego. Opóźnienie o 25° OWK powoduje zwiększenie temperatury w cylindrze o około 280°C. Utrata ciepła podczas przepływu gazów wylotowych przez turbosprężarkę, reaktor katalityczny i układ wylotowy prowadzi do realnego wzrostu temperatury jedynie o 70–80°C. Według badań przeprowadzonych dla Ford Motor Company połączenie dwóch opisanych wyżej strategii daje wzrost równy 250°C [94]. Izolacja układu wylotowego generuje dodatkowe 100–180°C. Osiągnięcie temperatury wymaganej do regeneracji dla silnika SI możliwe jest po uwzględnieniu wszystkich strategii, przy założeniu, że pojazd porusza się z minimalną prędkością 64 km/h [94]. Odbywa się to z udziałem kierowcy, który postępuje według poleceń opisanych przez producenta. Regeneracja serwisowa uruchamiana jest za pomocą urządzenia diagnostycznego i przeprowadzana jest analogicznie do regeneracji okresowej, jednak tryb pracy silnika zostaje wymuszony. W przypadku silników CI dodatkowa dawka paliwa powoduje przedostawanie się paliwa do oleju silnikowego, dlatego nieodłącznym elementem tego rodzaju regeneracji jest wymiana oleju wraz z filtrem. W regeneracji mechanicznej następuje wypłukanie lub wypchnięcie PM powietrzem wtłoczonym pod wysokim ciśnieniem do nośnika. Jeśli obie metody nie przywrócą sprawności na poziomie 90% i więcej, nośnik poddawany jest wypalaniu w piecu.

Niewłaściwa strategia regeneracji może spowodować uszkodzenie filtra cząstek stałych. Niestosowanie się do zaleceń producenta może skutkować podwyższeniem ciśnienia wstecznego wywołane gromadzeniem się cząstek i popiołów, możliwym uszkodzeniem mechanicznym spowodowanym dużym gradientem temperatury przy utlenianiu nadmiernej ilości cząstek lub zwiększoną emisją nanocząstek w wyniku niekontrolowanego utleniania [87].

4. Analiza warunków i parametrów eksploatacyjnych filtrów cząstek stałych

4.1. Parametry termodynamiczne gazów wylotowych

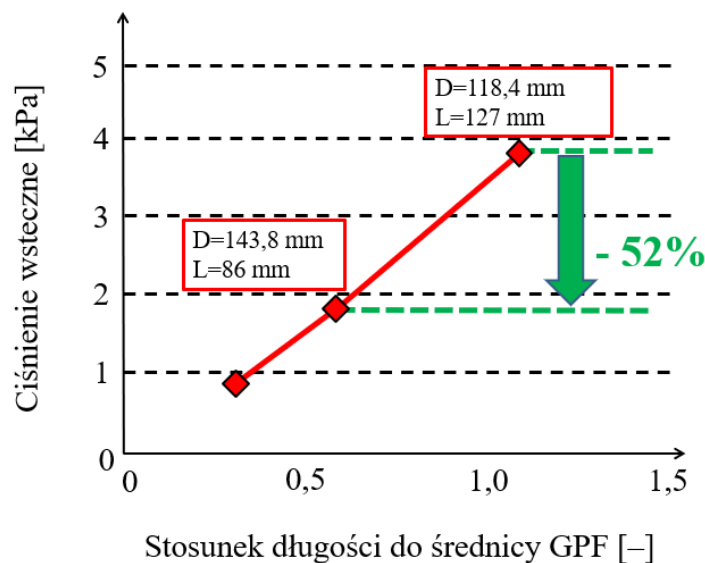
Zaprojektowanie układu wylotowego silnika spalinowego wymaga dostosowania parametrów termodynamicznych zależnych od pracy silnika. Sprawność elementów układu oczyszczania gazów wylotowych jest w największym stopniu uwarunkowana przez temperaturę przepływających gazów. Szczególnie istotnym aspektem jest regeneracja filtrów cząstek stałych, która bezpośrednio zależy od temperatury, przy której cząstki zaczynają się utleniać. Temperatura gazów wylotowych silników SI jest średnio o 300°C wyższa, niż w przypadku silników CI. Na podstawie pomiarów dokonanych w układzie wylotowym silnika SI DI w trzech punktach przy zwiększaniu prędkości obrotowej zauważono, że temperatura maksymalna w kolektorze wylotowym osiąga prawie 800°C (rys. 4.1) [85]. Temperatura gazów wylotowych za reaktorem katalitycznym nie przekroczyła 600°C. Na końcu układu wylotowego silnika temperatura maksymalna wynosiła ponad 300°C.



Rys. 4.1. Temperatura gazów wylotowych w silniku SI DI w kolektorze wylotowym, reaktorze katalitycznym i na końcu układu wylotowego [85]

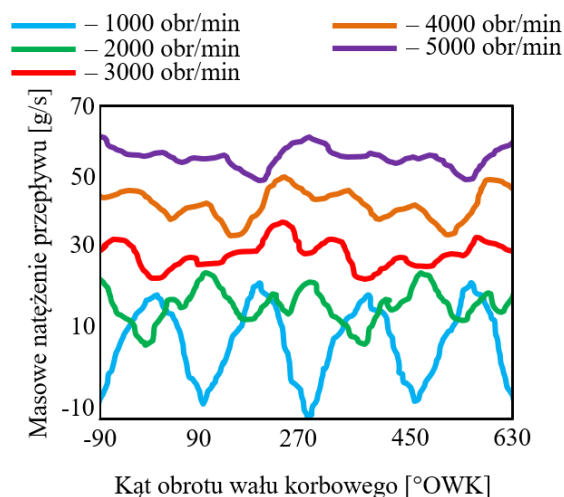
Ciśnienie wsteczne zdefiniowano jako ciśnienie gazów wylotowych, które wytwarzane jest w celu pokonania oporu hydraulicznego w układzie wylotowym, aby umożliwić odprowadzenie gazów do atmosfery. Pojęcie ciśnienia wstecznego jest określeniem kontrowersyjnym, ponieważ ciśnienie to wielkość skalarna, nie wektorowa, więc nie ma nadanego kierunku przepływu jednak z uwagi na powszechne użycie w literaturze zdecydowano się na jego wykorzystanie. Ruch gazów powodowany jest zmianą ciśnienia zgodnie z gradientem, czyli od większych do mniejszych wartości [114]. Wymagania dotyczące małej różnicy ciśnień przed i za filtrem rozpatrywane są w odniesieniu do skuteczności filtracji wymaganej dla danego zastosowania oraz minimalizacji wpływu na zużycie paliwa. W przypadku, gdy nie zapewniono właściwej

regeneracji filtra, zakumulowane cząstki mogą powodować wzrost ciśnienia, który może wywołać zmniejszenie ciśnienia doładowania, zwiększenie zużycia paliwa, emisji PM oraz CO i NO_x w wyniku zwiększenia temperatury spalania mieszanki [36]. W przypadku silników niedoładowanych wzrost ciśnienia w filtrze może spowodować zatrzymanie pewnej objętości gazów wylotowych przed i wewnątrz filtra wywołując efekt recyrkulacji (cofania się gazów do cylindra) i tym samym przyczynia się do redukcji NO_x o 2–3% [50, 114]. Badania dowodzą, że dostosowanie stosunku długości GPF do jego średnicy ze wzrostem pola przekroju poprzecznego przyczynia się do zmniejszenia ciśnienia wstecznego w filtrze (rys. 4.2). Zmniejszenie długości filtra przy jednoczesnym zwiększeniu pola przekroju poprzecznego przyczyniło się do zmniejszenia wartości ciśnienia wstecznego o 52% [109].

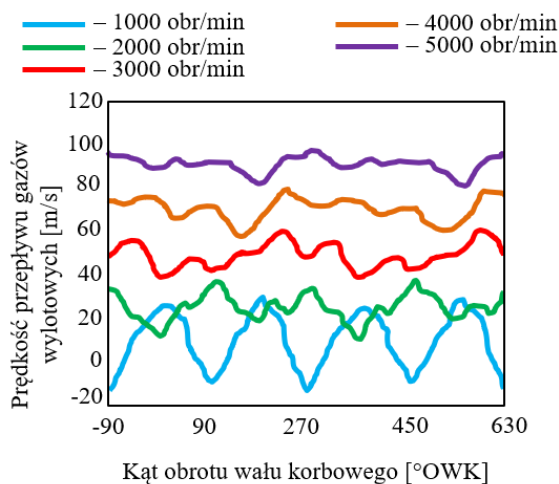


Rys. 4.2. Wpływ dostosowania pola przekroju poprzecznego do długości GPF na obniżenie ciśnienia wstecznego [109]

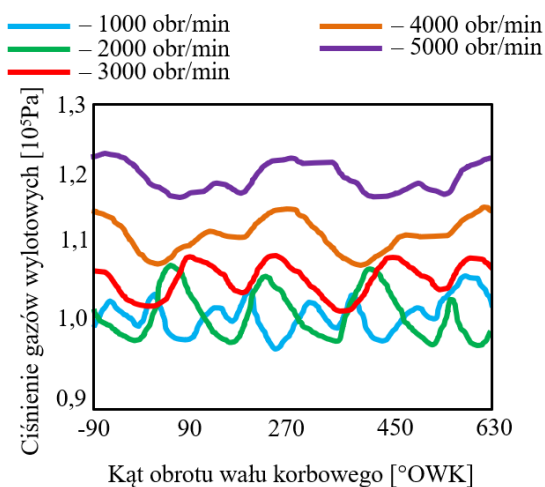
Prędkość obrotowa wału korbowego ma decydujący wpływ na masowe natężenie przepływu gazów wylotowych. Wartości zwiększają się wprost proporcjonalnie. Wahania występujące podczas cyklu pracy silnika SI mają zwiększoną częstotliwość dla małych prędkości obrotowych (rys. 4.3). Wraz z jej zwiększeniem fluktuacje ulegają stabilizacji. Przy prędkości 1000 obr/min zaobserwowano pojawienie się ciśnienia wstecznego, które wywołane było zmianą ciśnienia przepływu gazów wylotowych w suwie wylotu. Masowe natężenie przepływu jest takie samo w całej objętości kolektora wylotowego, jednak wraz ze zmianą pola przekroju poprzecznego przewodu odprowadzającego gazy wylotowe zmianie ulega ich energia kinetyczna. Przebieg krzywych na rys. 4.3 i 4.4 jest zbliżony, ponieważ masowy przepływ gazów wylotowych jest determinowany głównie przez prędkość ich przepływu, podczas gdy gęstość zmienia się nieznacznie. Średnia wartość ciśnienia gazów wylotowych na cykl pracy silnika zwiększa się wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej, ale amplituda wahań ciśnienia zmniejsza się (rys. 4.5). Z krzywej ciśnienia wynika, że amplituda energii ciśnienia jest większa i stosunkowo stabilna przy dużej prędkości obrotowej. Dla małych wartości ciśnienie jest małe, a pulsacja większa, co może być przyczyną niestabilnej pracy silnika w przypadku zastosowania turbosprężarki.



Rys. 4.3. Masowe natężenie przepływu gazów wylotowych silnika SI w funkcji kąta obrotu wału korbowego [61]

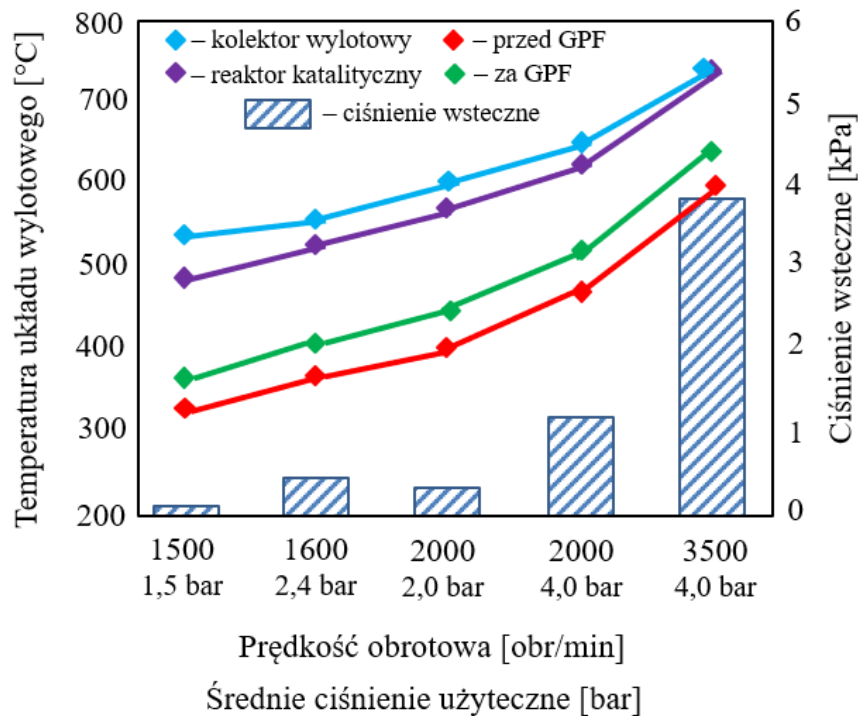


Rys. 4.4. Prędkość przepływu gazów wylotowych silnika SI w funkcji kąta obrotu wału korbowego [61]



Rys. 4.5. Ciśnienie gazów wylotowych silnika SI w funkcji kąta obrotu wału korbowego [61]

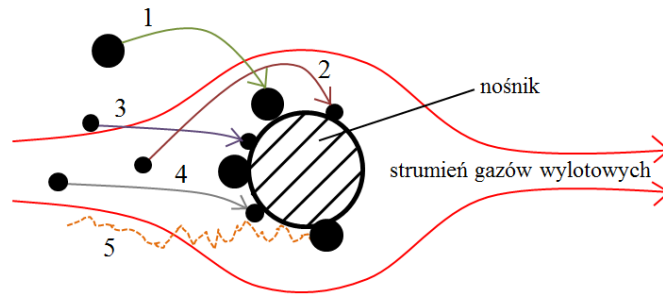
Na rysunku 4.6 przedstawiono badania dotyczące silnika SI DI wyposażonego w filtr GPF z metalowym nośnikiem w wybranych punktach pracy charakterystycznych dla amerykańskich testów FTP-75 (*Federal Test Procedure*) i HWFET (*Highway Fuel Economy Test Cycle*) dotyczących odpowiednio warunków miejskich i autostradowych. Podczas badań określono temperaturę w wybranych punktach układu wylotowego oraz ciśnienie wsteczne. Temperatura w kolektorze wylotowym w warunkach częściowego obciążenia 1500 obr/min przy średnim ciśnieniu użytecznym 1,5 bar i 3500 obr/min przy 4,0 bar były odpowiednio o 217°C i 132°C większe niż przed GPF (rys. 4.6). Temperatura przed i za GPF zwiększyła się z 331°C i 368°C do 617°C i 654°C ze stałą różnicą około 37°C w warunkach częściowego obciążenia. Ciśnienie wsteczne w GPF było mniejsze niż 1,0 kPa w trzech punktach pracy silnika. Wartość uległa zwiększeniu o 3,9 kPa przy 3500 obr/min i średnim ciśnieniu użytecznym równym 4,0 bar [68]. Umieszczenie reaktora katalitycznego przed GPF skutkowało zmniejszeniem temperatury gazów wylotowych na wlocie filtra o 200°C przy minimalnym obciążeniu. Temperatura gazów wylotowych uzyskana podczas pracy silnika z prędkością obrotową 3500 obr/min potwierdza osiągnięcie przez GPF wartości umożliwiającej regenerację pasywną filtra przy wartości oscylującej wokół 600°C.



Rys. 4.6. Temperatura układu wylotowego i ciśnienie wsteczne GPF w zmiennych warunkach częściowego obciążenia silnika dla $\lambda=1$ [68]

4.2. Analiza sposobów filtracji cząstek stałych

Filtracja gazów wylotowych przez materiał porowaty nośnika jest procesem złożonym, zmiennym w czasie i charakteryzującym się oddziaływaniem cząstek stałych (fazy zdyspergowanej) oraz składników gazowych (fazy dyspersyjnej) z medium filtracyjnym. Proces filtracji polega na zatrzymywaniu cząstek stałych wewnątrz filtra za pomocą mechanizmów filtracji: dyfuzyjnego, inercyjnego (zderzenia bezwładnościowego), opadania grawitacyjnego, bezpośredniego zaczepiania i elektromagnetycznego (rys. 4.7) [23, 72, 106].

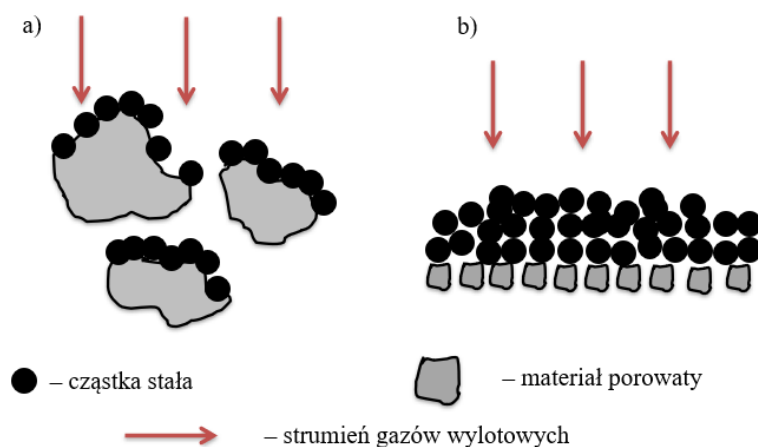


Rys. 4.7. Mechanizmy filtracji cząstek stałych w filtrze: 1 – grawitacyjny, 2 – elektromagnetyczny, 3 – inercyjny (zderzenie bezwładnościowe), 4 – bezpośrednie zaczepienie, 5 – dyfuzji [23]

Teoria filtracji aerozolu zakłada, że procesy zatrzymywania zanieczyszczeń w idealnych strukturach porowatych następują przy udziale jednego, często dwóch lub trzech z przedstawionych wyżej mechanizmów. W rzeczywistych warunkach proces filtracji przebiega wskutek więcej niż jednego mechanizmu. Głównymi, w przypadku filtracji gazów wylotowych, są mechanizmy: bezwładnościowy, dyfuzyjny i bezpośredniego zaczepiania. Ostatni z mechanizmów ma znaczenie głównie w filtracji cząstek o średnicy powyżej 100 nm, ale udowodniono także jego wpływ na filtrację nanocząstek [78]. Cząstki o średnicy poniżej 100 nm zmieniają kierunek ruchu w sposób przypadkowy, przez zderzanie się z cząsteczkami gazu, co zwiększa prawdopodobieństwo kontaktu z materiałem porowatym podczas ruchu wzdłuż strumienia gazów wylotowych. Zjawisko to określa się dyfuzyjnym mechanizmem zatrzymywania cząstek. Jeżeli odległość cząstki od materiału nośnika jest mniejsza niż jej promień, zostaje ona filtrowana przez mechanizm bezpośredniego zaczepienia [49].

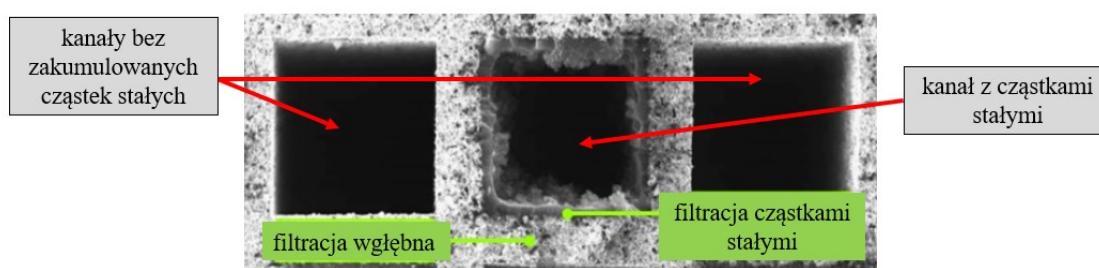
Poza klasyczną teorią filtracji aerozolu wpływ na proces filtracji cząstek stałych mają także mechanizmy wynikające z budowy i właściwości fizykochemicznych stosowanych nośników. Zatrzymywanie cząstek stałych następuje w dwóch trybach (rys. 4.8) [56, 102]:

- filtracja wgłębna (*depth filtration*),
- filtracja przez warstwę nagromadzonych cząstek na powierzchni kanału (*soot cake filtration*).



Rys. 4.8. Zatrzymywanie cząstek stałych przez: a) filtrację wgłębna, b) filtrację przez warstwę cząstek stałych

W początkowej fazie użytkowania filtra cząstek stałych zachodzi filtracja wgłębna, czyli przepływ gazów wylotowych przez porowaty materiał nośnika. Wraz z upływem eksploatacji następuje stopniowe osadzanie cząstek stałych w porach otwartych nośnika (rys. 4.9). Prowadzi to do powstania warstwy cząstek, która częściowo przejmuje rolę materiału filtracyjnego. W przypadku nadmiernego napełnienia filtra skutkującego powstawaniem ciśnienia wstecznego, konieczna jest jego regeneracja w celu przywrócenia odpowiednich parametrów pracy [56, 102]. Nowy filtr z nośnikiem ceramicznym, bez zakumulowanych cząstek stałych, cechuje się wydajnością filtracji na poziomie 50–60% [25, 58]. Badania dowodzą, że filtracja w DPF przez warstwę cząstek skutkuje zwiększeniem wydajności filtracji do 99%, podczas gdy w GPF nie przewidywano początkowo jej powstawania, lecz okazało się, że mniej niż 0,03 g nagromadzonych cząstek zwiększyło skuteczność filtracji do 90% dla nośnika 300 CPSI [58].

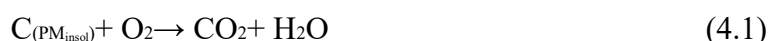


Rys. 4.9. Widok przekroju poprzecznego wybranych kanałów nośnika ceramicznego w zależności od rodzaju mechanizmu filtracji cząstek [114]

Emisja nanocząstek spowodowała konieczność opracowania technologii zwiększającej wydajność filtracji w pojazdach o zerowym przebiegu, czy też początkowej fazie eksploatacji, która nie posiadała warstwy PM zwiększającej sprawność filtracji. Przeprowadzono badania nowych nośników pokrytych odpowiednio małą ($0,5 \text{ g/dm}^3$) i dużą ($1,5 \text{ g/dm}^3$) ilością Al_2O_3 . Przy dużej gęstości tego tlenku powstała warstwa, która spowodowała wzrost filtracji z 75% do 90% przy jednoczesnym niewielkim wzroście ciśnienia wstecznego [2, 62].

4.3. Analiza utleniania cząstek stałych

Utlenianie PM w filtrach GPF zachodzi podczas eksploatacji pojazdu w wyniku regeneracji pasywnej. W przypadku filtra z nośnikiem pokrytym katalitycznie temperatura wymagana do utlenienia PM wynosi około 420°C [39]. Reakcję katalitycznego utleniania PM można zapisać za pomocą ogólnego równania stechiometrycznego (4.1) [59]:



Powyższy wzór stanowi uproszczony przebieg reakcji utleniania, lecz zrozumienie kinetyki procesu zachodzącego w najbardziej powszechnych warunkach i temperaturze jest niezbędnym elementem. Obecność pary wodnej w gazach wylotowych jest produktem utleniania wodoru będącego składnikiem paliwa węglowodorowego. Biorąc pod uwagę powyższe czynniki, równanie utleniania PM zapisać można następującym równaniem szybkości reakcji (4.2) [12]:

$$-\frac{dm_s}{dt} = k \cdot m_s^n \cdot p_{\text{O}_2}^r = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot m_s^n \cdot p_{\text{O}_2}^r, \quad (4.2)$$

gdzie:

m_s – masa PM,

p_{O_2} – ciśnienie cząstkowe tlenu,

t – czas,

k – stała szybkości reakcji,

A – współczynnik częstotliwości,

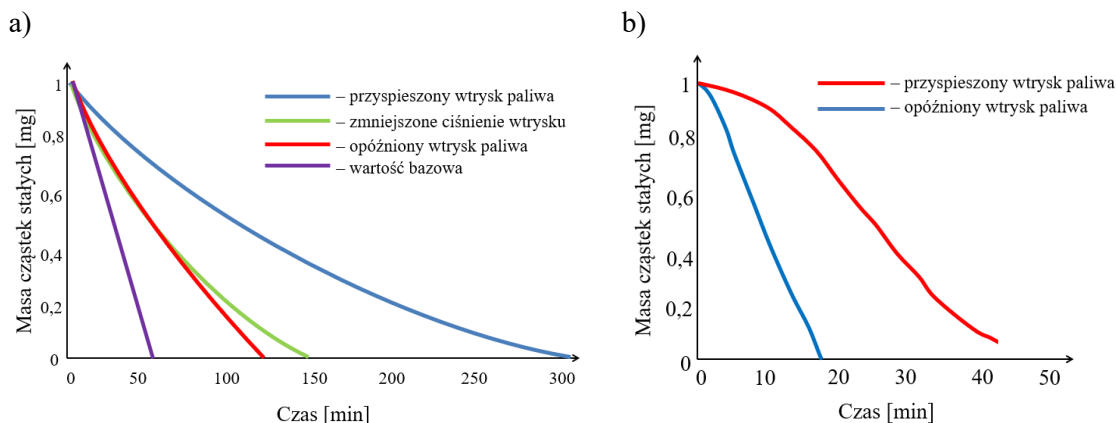
E_a – energia aktywacji,

R – stała gazowa,

T – temperatura,

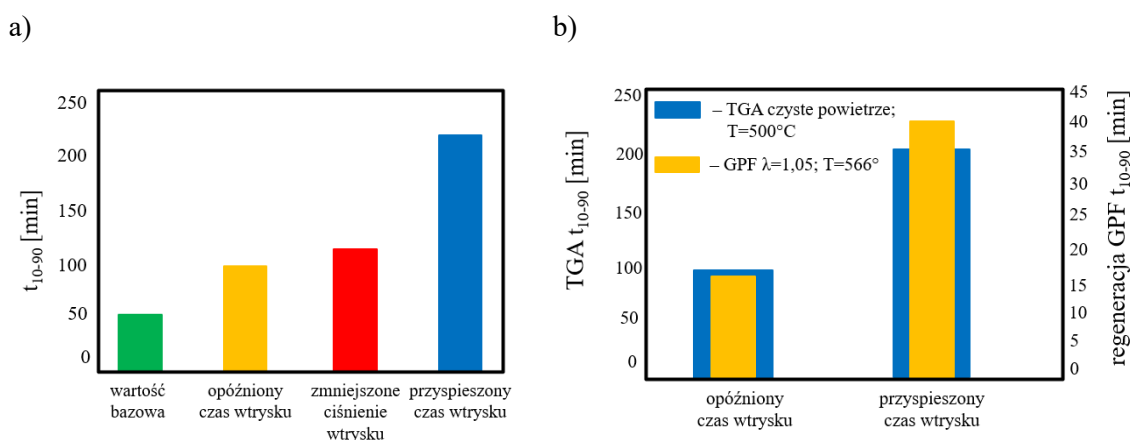
n, r – kolejność reakcji odpowiednio w sadzy i tlenie.

Kolejność reakcji w równaniu odnosi się do zależności pomiędzy szybkością reakcji chemicznej, a stężeniem każdego z reagentów. Badanie reaktywności PM jest ważne dla zaprojektowania odpowiedniej strategii regeneracji [24]. Cząstki stałe z silników SI są bardziej reaktywne, niż PM pochodzące z silników CI. Prawdopodobnie wynika to z amorficznej struktury i większego stosunku popiołu do PM. Na podstawie badań próbek PM z silnika SI DI pochodzących z różnych mieszanek benzyny i olejów smarujących stwierdzono, że popiół pochodzący z Ca (głównego dodatku w oleju smarującym silnika SI) znacząco poprawił reakcję utleniania PM. Udział $CaSO_4$, który stanowi jeden z głównych związków popiołu w silnikach CI ma prawie pomijalny wpływ na przebieg reakcji [14]. Z przeprowadzonych badań wynika, że reaktywność i właściwości chemiczne PM z silników SI DI ulegają zmianie w sposób ciągły podczas utleniania. Energia aktywacji wzrasta liniowo, co wskazuje, że reaktywność PM maleje w miarę trwania procesu utleniania [17]. Najważniejszym kryterium oceny reaktywności PM z silników SI DI jest zawartość katalitycznych popiołów metalicznych zawierających m.in. Ca i Zn [15]. W badaniach wykazano, że PM z silników SI DI zawierają o rząd wielkości większą frakcję popiołu w porównaniu do PM z silników CI, co zwiększa jej reaktywność przez katalityczne działanie popiołu pochodzącego z dodatków oleju smarującego (głównie Ca) i stosunku PM do zawartości popiołu. Badania reaktywności PM przeprowadzono za pomocą analizatora termogravimetrycznego TGA (*Thermogravimetric Analyzer*) dla określonych warunków wtrysku paliwa tj. opóźnionego początku wtrysku paliwa, małego ciśnienia wtrysku, przyspieszonego początku wtrysku paliwa (rys. 4.10). Wartość bazowa odzwierciedla podstawowe warunki pracy silnika z prędkością obrotową 1600 obr/min i średnim ciśnieniem użytecznym 8 bar. Największe oddziaływanie na czas trwania reakcji utleniania ma opóźnienie wtrysku paliwa (rys. 4.10a). Badaniu poddano także filtr GPF wypełniony PM powstałymi podczas spalania paliwa wtryskiwanego z przyspieszeniem i opóźnieniem (rys. 4.10b). Następnie filtr poddano regeneracji przy $\lambda=1,05$ i temperaturze gazów wylotowych 560°C. Do określenia masy PM wykorzystano czujnik RF (*Radio Frequency*). Wyniki obu eksperymentów są zgodne i wskazują na wpływ opóźnienia początku wtrysku paliwa na skrócenie czasu utleniania PM, co prowadzi do wniosku, że struktura krystalograficzna PM formowanych w takich warunkach w komorze spalania posiada większą reaktywność. Kolejną możliwą przyczyną może być również stosunek popiołu do PM w filtrze zależny od parametrów wtrysku paliwa zdefiniowanych w jednostce sterującej [25]. Ilościową reaktywność PM określono przez obliczenie czasu w jakim znormalizowana PM_m uzyska wartość od 0,9 do 0,1 (rys. 4.11a) [25]. Mniejsza wartość odpowiada PM o większej reaktywności, ponieważ ilość czasu potrzebnego na utlenienie w określonej temperaturze jest mniejsza. Stwierdzono, że PM o największej reaktywności, powstała przy opóźnionym czasie wtrysku paliwa, cechuje się cztery razy krótszym czasem utleniania.



Rys. 4.10. Przebieg utleniania PM: a) za pomocą analizatora TGA, b) podczas regeneracji GPF na hamowni silnikowej [25]

Dotychczasowe badania sugerują, że reaktywność PM pochodzącej z silników benzynowych jest głównie zależna od ilości zgromadzonego popiołu, szczególnie od ilości Ca lub Mg powstałego w wyniku spalania oleju smarującego, ponieważ pełni on rolę katalizatora przyspieszającego utlenianie PM [15, 25]. Na podstawie obliczonej reaktywności PM podczas utleniania w analizatorze TGA oraz na hamowni silnikowej potwierdzono, że wyniki otrzymane podczas badań są zbliżone (rys. 4.11b). W obu przypadkach potwierdzono zwiększenie reaktywności PM przez opóźnienie początku wtrysku paliwa [25].



Rys. 4.11. Czas utleniania PM oraz regeneracji GPF: a) czas utleniania PM z użyciem analizatora TGA, b) wpływ czasu rozpoczęcia wtrysku paliwa na utlenianie PM oraz regenerację filtra [25]

Odpowiednie dostosowanie własności fizykochemicznych filtra do jego przeznaczenia jest podstawowym elementem projektowania układu wylotowego. Analiza parametrów termodynamicznych wykazała, że istnieje możliwość wykorzystania filtrów z nośnikiem metalowym ze wskazaniem na korzystność rozwiązania wynikającą z mniejszej bezwładności cieplnej filtrów metalowych. Pojazdy z silnikami SI z uwagi na wyższą temperaturę gazów wylotowych charakteryzują się dominacją regeneracji pasywnej w trakcie eksploatacji GPF [89]. Zastosowanie filtra z nośnikiem metalowym może ułatwić przebieg procesu przez szybsze okresowe nagrzewanie filtra w zależności od parametrów pracy silnika. Szybsze osiągnięcie temperatury *light-off* przez nośniki metalowe w okresie rozruchu pojazdu ma duży wpływ na emisję nanocząstek w terenie

zabudowanym, w którym stanowią one największe zagrożenie. Duże wahania temperatury w układzie wylotowym silnika SI, w szczególności przy małych prędkościach obrotowych, powoduje ograniczenie trwałości nośnika ceramicznego wynikające z własności fizykochemicznych materiału ceramicznego. W przypadku folii metalowych wahania temperatury nie mają wpływu w tak dużym stopniu na trwałość nośnika z nich wykonanych. Rozwiązanie, w którym w układzie wylotowym zastosowany jest GPF z naniesioną warstwą pośrednią i katalityczną, pełniącą funkcję TWC, skutkuje występowaniem tylko jednego elementu układu oczyszczania gazów wylotowych. Zaletą rozwiązania jest brak strat ciepła wynikających z przepływu gazów wylotowych przez reaktor TWC i tym samym większą sprawność utleniania PM wewnątrz filtra w większej temperaturze.

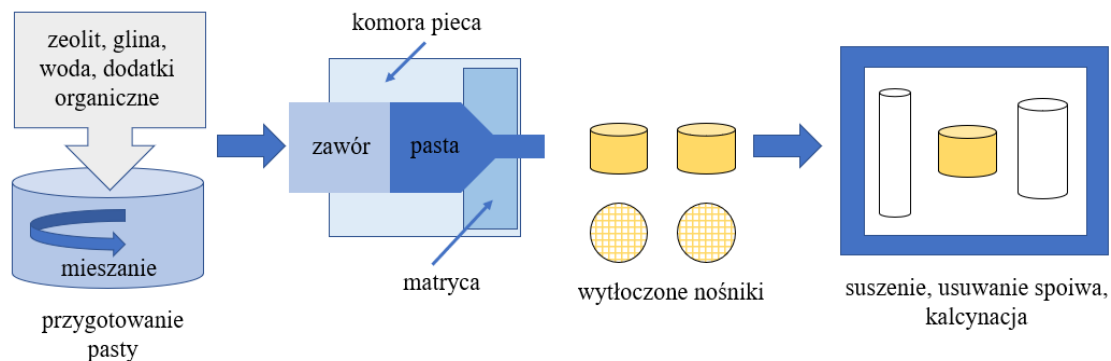
5. Analiza produkcji, eksploatacji i recyklingu nośników ceramicznych i metalowych

5.1. Wytwarzanie filtrów cząstek stałych

5.1.1. Z nośnikiem ceramicznym

Ceramiczne nośniki filtrów cząstek stałych są od wielu lat najczęściej wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym. Ich dominacja na rynku wynika z ograniczeń technologicznych dotyczących wytwarzania nośników metalowych, przy czym szacuje się, że liczba produkowanych nośników metalowych ulegnie stopniowemu zwiększeniu, ponieważ proces wytwarzania filtrów ceramicznych składa się z wielu etapów, które wymagają wykorzystania urządzeń do mielenia, mieszania, wytłaczania i suszenia, podczas gdy koncepcja wytwarzania nośników metalowych opiera się na ukształtowaniu folii metalowej.

Nośniki ceramiczne najczęściej wykonane są z syntetycznego kordierytu. Materiał ten spełnia szereg wymagań wytrzymałościowych i konstrukcyjnych, takich jak: duża wartość GSA, duża powierzchnia OFA, mały współczynnik rozszerzalności cieplnej, kompatybilność z warstwą katalityczną i odporność na proces utleniania [114]. Nośnik ceramiczny powstaje w procesie wytłaczania. Sproszkowane surowce (np. tlenek glinu) tworzą pastę na bazie wody, do której dodawane są smary, środki wiążące i topniki. Po wytłoczeniu następuje nadanie odpowiedniej długości, suszenie i kalcynowanie nośnika (w temperaturze powyżej 1400°C) (rys. 5.1).



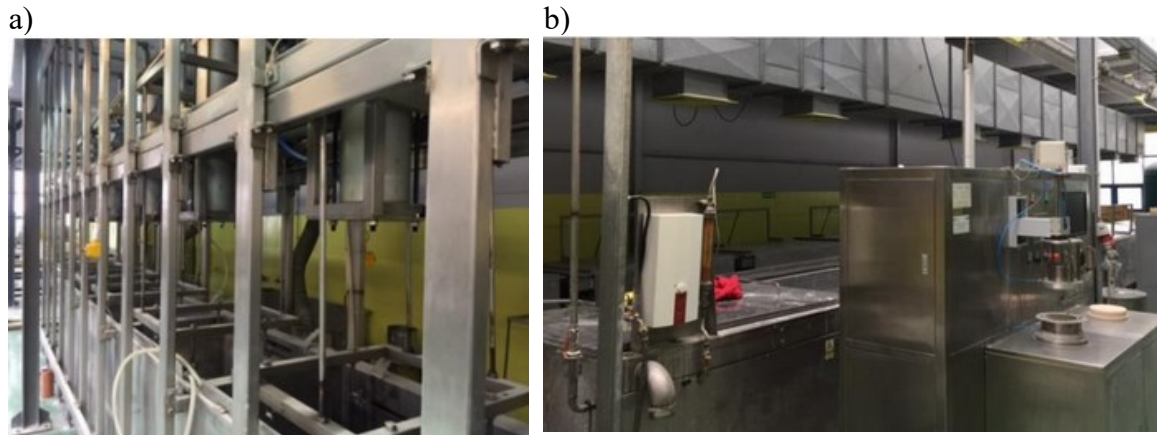
Rys. 5.1. Wytłaczanie nośnika ceramicznego [3]

Różnica w wymiarach gotowego produktu jest nieznaczna i w przypadku filtrów do mniejszych silników jest przewidywana i dostosowana do specyfikacji gotowego nośnika przez szlifowanie. Proces kalcynacji wpływa na ostateczne wymiary nośnika. Etap wymaga zastosowania specjalistycznego pieca z dużym zapotrzebowaniem energii. Nośniki o dużych średnicach wymagają bardziej złożonego i wieloetapowego procesu produkcyjnego. Wymiary wytłaczanych i kalcynowanych elementów są zawyżane, następnie dostosowywane do specyfikacji za pomocą szlifowania i nakładania pasty ceramicznej, a następnie suszone w piecu [41].

5.1.2. Z nośnikiem metalowym

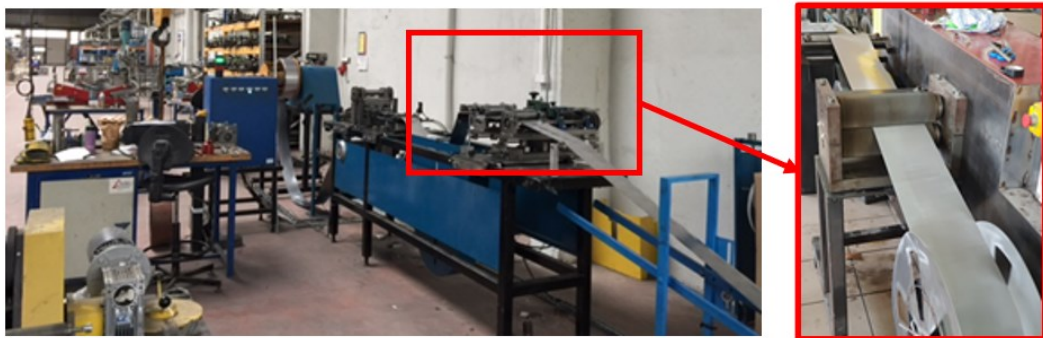
Metalowe nośniki powstają w wyniku zwinięcia płaskiej oraz falistej/perforowanej folii metalowej. Cienkie ścianki zapewniają mały wzrost ciśnienia wstecznego na wlocie

gazów do nośnika i dużą powierzchnię OFA. Użycie folii metalowej ułatwia tworzenie tych elementów o dużych średnicach, mających zastosowanie w oczyszczaniu gazów wylotowych silników eksploatowanych stacjonarnie (np. generatory prądu) oraz maszyn pozadrogowych NRMM (*Non-road Mobile Machinery*). Wytwarzanie filtrów z nośnikiem metalowym charakteryzuje się krótszym czasem produkcji oraz zmniejszoną liczbą procesów technologicznych w porównaniu do nośników ceramicznych. Nośniki produkuje się przez zwijanie folii o grubości 0,05 mm. Materiał na początku produkcji przechodzi proces odtłuszczania w celu zmaksymalizowania własności adhezyjnych powierzchni. Odtłuszczanie odbywa się w myjkach ultradźwiękowych (rys. 5.2).

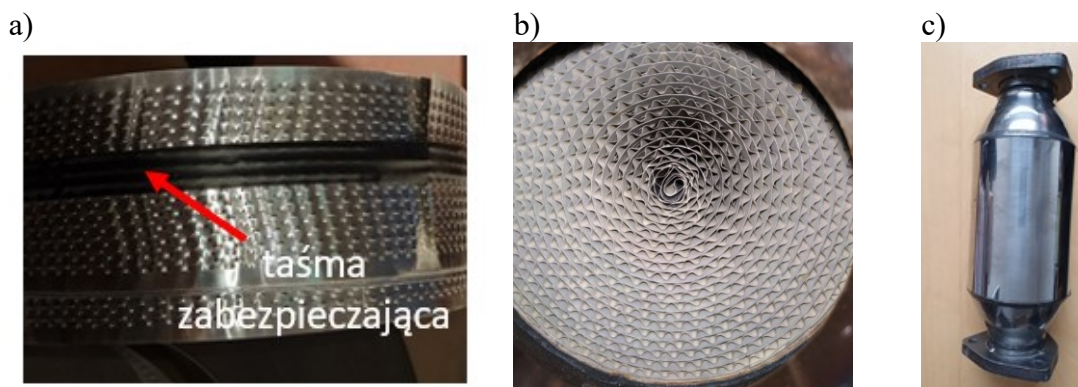


Rys. 5.2. Obróbka folii metalowej na początku produkcji: a) odtłuszczanie w myjkach ultradźwiękowych, b) pokrywanie warstwami katalitycznymi wraz z warstwą pośrednią metodą wannową

Następnym etapem produkcji nośnika jest proces wyoblania (rys. 5.3). Za pomocą podajnika z prowadnicą folia metalowa kierowana jest do urządzenia, które formuje docelowy kształt nośnika. Następnie folię o wymaganej szerokości nawija się na szpulę o zdefiniowanej średnicy i zabezpiecza taśmą przed przywróceniem poprzedniego kształtu (rys. 5.4a). Przygotowana folia pokrywana jest warstwami katalitycznymi wraz z warstwą pośrednią metodą wannową, rzadziej natryskową. W przypadku filtrów cząstek stałych stosowane jest pokrycie zawierające pierwiastki utleniające, głównie platynę. Warstwa katalityczna powinna zostać naniesiona w sposób jednorodny na całej powierzchni nośnika. W tworzonych filtrach dokładny skład warstwy katalitycznej jest częścią patentu producenta, który decyduje o proporcjach nanoszonych pierwiastków utleniających bądź utleniająco-redukujących. Pokrycie katalityczne różni się w zależności od rodzaju wytwarzanego elementu.



Rys. 5.3. Proces wyoblania folii metalowej



Rys. 5.4. Widok wybranych etapów wytwarzania nośnika metalowego: a) zabezpieczenie folii taśmą przed przywróceniem pierwotnego kształtu b) przekrój gotowego nośnika, c) widok kompletnego filtra cząstek stałych

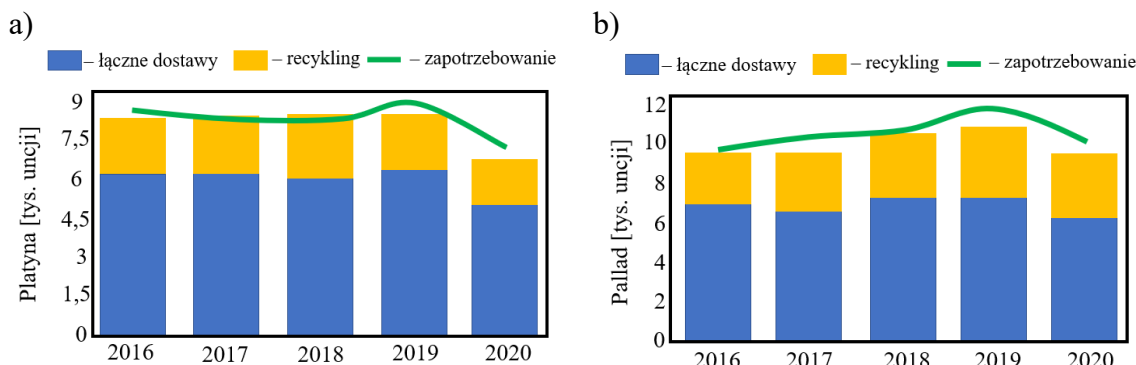
W przypadku pojazdów samochodowych najczęstszym kształtem nośnika jest walec (rys. 5.4b). Kolejnym etapem produkcji jest wytworzenie obudowy. Zewnętrzna część nośnika oraz obudowa łączone są przez spawanie bądź lutowanie. Proces ten przeprowadzany jest ręcznie ze względu na duże różnice w produkowanych filtrach i reaktorach. Końcowym etapem jest dodanie dyfuzora na wlocie i konfuzora na wylocie nośnika w zależności od wymagań odbiorcy i zastosowania do konkretnego rozwiązania (rys. 5.4c).

5.2. Odzysk metali szlachetnych z reaktorów katalitycznych i filtrów na świecie

5.2.1. Analiza rynku metali szlachetnych

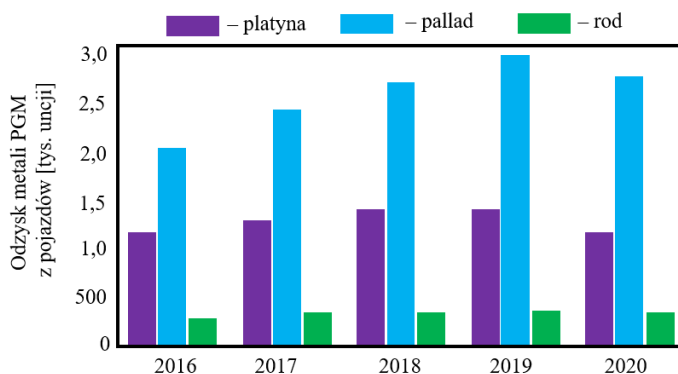
Metale z grupy platynowców stanowią najrzadsze pierwiastki w litosferze ziemskiej. Wykorzystanie platyny, palladu i rodu jest istotnym elementem nowoczesnych procesów przemysłowych, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym. Spośród wymienionych metali najbardziej reaktywnym katalizatorem jest platyna, która stosowana jest do reakcji utleniania. Pallad i rod są używane odpowiednio do reakcji utleniania i redukcji [100]. Postępujące zmniejszanie wartości dopuszczalnych emitowanych związków toksycznych i szkodliwych z gazów wylotowych powoduje wzrost popytu na metale szlachetne. Wynika to z konieczności wyposażenia każdego nowego pojazdu dopuszczonego do sprzedaży w reaktor katalityczny lub filtr cząstek stałych. Ograniczone zasoby naturalne oznaczają konieczność zwiększenia wskaźnika recyklingu w celu zagwarantowania dostaw metali PGM. W Ameryce Północnej, Japonii i Europie ilość odzyskiwanych metali szlachetnych wzrosła z bardzo małej wartości w 2000 r. do ponad 50% w 2017 r. [100]. Na świecie wydobycie metali PGM wynosi ponad 400 ton rocznie. Po kilkuletniej nadwyżce w ostatniej dekadzie rynek platyny jest odpowiednio zaopatrzonej pomimo deficytów w latach 2019–2020 (rys. 5.5a). Blokady i ograniczenia w USA i Europie, wywołane pandemią, zmniejszyły popyt na gąbkę platynową (forma wymagana przez nabywców przemysłowych i motoryzacyjnych). Zmniejszenie zapotrzebowania na reaktory katalityczne i filtry cząstek stałych w 2020 r. o 12% nie miało równoważnego wpływu na popyt palladu, z uwagi na stopniową zmianę w proporcji metali stosowanych w układach oczyszczania gazów wylotowych (rys. 5.5b). Pomimo tego, w przypadkach obu pierwiastków

odnotowano zapotrzebowanie większe od aktualnie dostępnych zasobów pochodzenia pierwotnego i wtórnego [16].



Rys. 5.5. Podaż i popyt w latach 2016–2020: a) platyna, b) pallad [16]

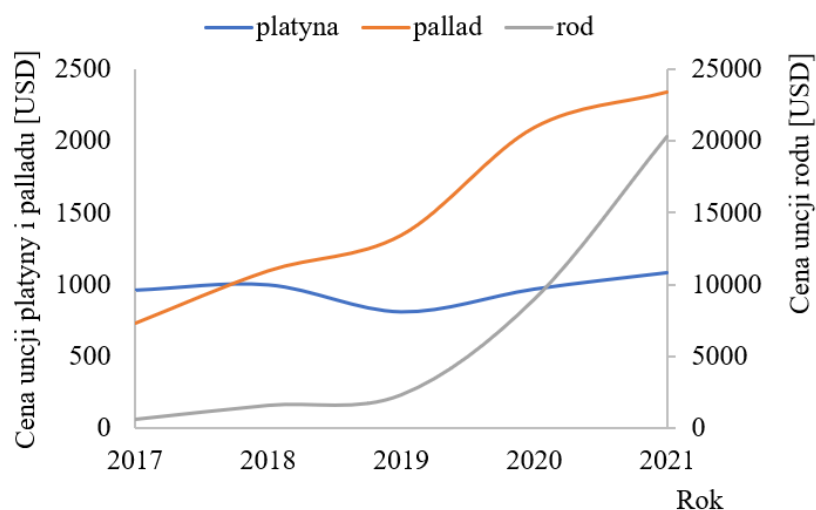
Wpływ pandemii koronawirusa na sektor recyklingu reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych odzwierciedlił się szczególnie w przypadku platyny. Utrudnienia w łańcuchu dostaw i globalne zmniejszenie sprzedaży pojazdów LDV i HDV (odpowiednio o 22% i 17%) skutkowało ograniczeniem wycofywania wyeksploatowanych układów katalitycznych z rynku pierwotnego. Podczas gdy w latach 2016–2019 następowało równomierne zwiększenie odzysku katalizatorów, warunki ekonomiczne i społeczne wynikające z pandemii wywołały zmianę tendencji w 2020 r., skutkiem czego jest nieustanny wzrost cen pierwiastków wynikający ze zwiększonego zapotrzebowania (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Odzysk metali z grupy PGM pochodzących z przemysłu motoryzacyjnego w latach 2016–2020 [16]

Przemysł motoryzacyjny w Ameryce Północnej, Europie, Chinach i Japonii w 2017 r. charakteryzował się zapasem metali PGM na poziomie 3,65 tys. ton, w tym 1,33 tys. ton platyny, 1,95 tys. ton palladu i 0,37 tys. ton rodu [100]. Poziom wykorzystania pierwiastków stanowi szansę na wtórne wykorzystanie metali przez recykling elementów wycofanych z eksploatacji. Przetworzenie 2 ton wyeksploatowanych reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych, a w tym odzysk metali z grupy PGM, stanowi ekwiwalent wydobywania 150 ton rudy oraz prowadzi do oszczędności energetycznych przez eliminację etapów towarzyszących otrzymaniu czystego pierwiastka [34]. W styczniu 2021r. cena 28,35 g (jedna uncja) palladu wynosiła 2308 USD [124]. W jednym reaktorze katalitycznym wykorzystywanym w pojazdach osobowych znajduje się od 3–7 g platynowców [123]. W ciągu ostatnich pięciu lat

zaobserwowano pięciokrotny wzrost ceny palladu (rys. 5.7). Ma to bezpośrednie przełożenie na cenę reaktora katalitycznego, która jest składową ceny wytworzenia nowego pojazdu. Najmniejszą różnicę w cenie zaobserwowano dla platyny, która z wyjątkiem zmniejszenia na początku 2020 r. utrzymuje się na podobnym poziomie od 2017 r. (rys. 5.7). Od początku 2020 r. nastąpił wzrost ceny uncji rod o około 80%. Głównym odbiorcą tego pierwiastka jest przemysł motoryzacyjny, w którym zapotrzebowanie na wydobycie jest wywołane koniecznością spełnienia wymagań norm emisji przez zastosowanie elementów układów oczyszczania gazów wylotowych.

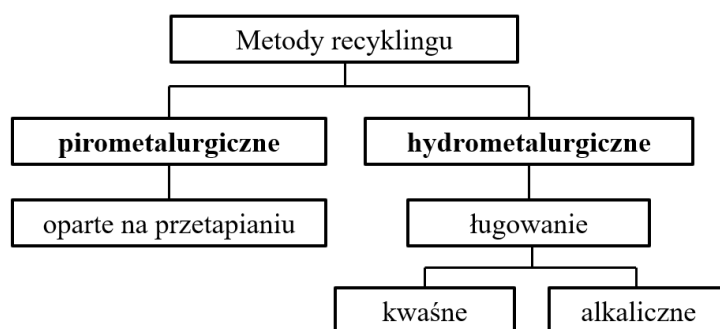


Rys. 5.7. Cena uncji platyny, palladu i rod w latach 2017–2021 [124]

Wskaźnik odzysku na poziomie 95% dla platyny i palladu potwierdza konieczność i zasadność recyklingu nośników reaktorów i filtrów [93]. Przewiduje się zwiększenie popytu na reaktory katalityczne i filtry cząstek stałych o 13% w latach 2021–2022 r. [16].

5.2.2. Odzysk materiałów katalitycznych z nośników ceramicznych

Podstawowe metody recyklingu reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych to hydrometalurgiczna i pirometalurgiczna (rys. 5.8).

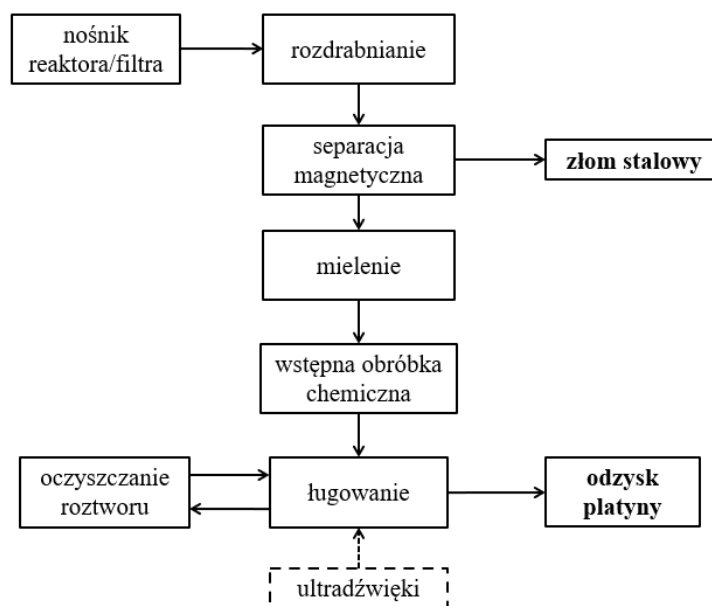


Rys. 5.8. Podstawowe metody recyklingu nośników reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych [99]

Oba rozwiązania umożliwiają odzyskiwanie 70% rod oraz 95% platyny i palladu [34, 35, 93]. Zgodnie z zaleceniami Dyrektywy 2000/53/WE w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji producenci pojazdów muszą zapewnić, że nowe pojazdy

nadają się do ponownego użytku i/lub recyklingu w min. 85% w przeliczeniu na masę oraz w 95% w przypadku ponownego użytku i/lub odzysku [22]. Wskaźnik recyklingu dla metali wynosi ponad 95%, z czego większość można wykorzystać kilkakrotnie bez pogorszenia wytrzymałości oraz własności fizykochemicznych [98].

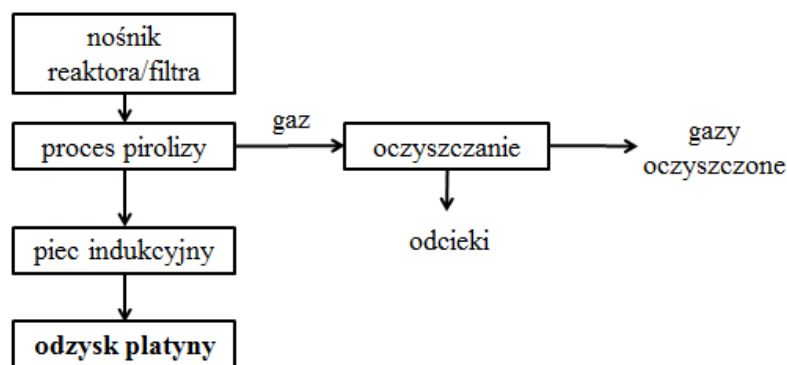
Najszerze zastosowanie w odzysku platynowców mają metody hydrometalurgiczne, w których wykorzystywane jest ługowanie kwaśne lub alkaliczne (rys. 5.9). Po usunięciu obudowy reaktora/filtra, nośnik zostaje zmielony za pomocą rozdrabniacza obrotowego. Fragmenty ceramiczne poddaje się dalszemu mieleniu, co zwiększa powierzchnię reakcyjną (mniejsze elementy szybciej reagują podczas dalszej obróbki). Następnym etapem jest wypalenie nadmiaru węglowodorów i PM, stanowiące wstępną obróbkę chemiczną przed ługowaniem. Najczęściej stosowanym czynnikiem jest kwas siarkowy (VI) lub wodorotlenek sodu. Możliwe jest ponowne wykorzystanie czynnika wmywającego po filtracji i oczyszczeniu. Odzyskane w wyniku tej metody pierwiastki mogą być ponownie wykorzystane w produkcji reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych [99]. Do głównych zalet metody należą: łatwość prowadzenia procesu, małe koszty inwestycyjne oraz eliminacja emisji pyłów i gazów [90]. Zagrożeniem środowiskowym związanym ze stosowaniem metody hydrometalurgicznej jest powstawanie dużej ilości roztworów odpadowych o wysokim stężeniu, które powstają na etapie ługowania [34, 35]. W celu zwiększenia wydajności procesu ługowania, przez zmniejszenie energochłonności, stosuje się fale ultradźwiękowe (rys. 5.9). Wytworzona w ten sposób dodatkowa ilość energii powoduje skrócenie czasu i zwiększenie dokładności rozpuszczania substancji, co skutkuje zwiększeniem odzysku metali z grupy PGM o kilkanaście procent w porównaniu z tradycyjnym ługowaniem [60].



Rys. 5.9. Schemat etapów odzysku platyny z nośników ceramicznych z użyciem metody hydrometalurgicznej oraz ługowania kwasem wspomaganym ultradźwiękami [99]

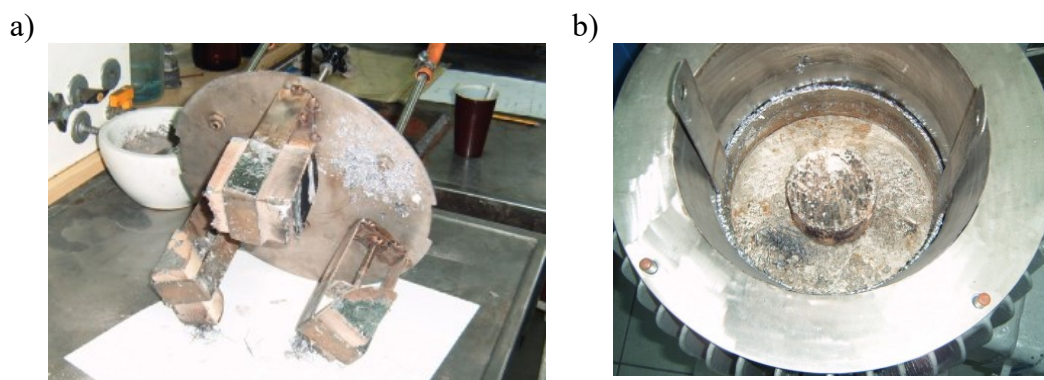
Drugim sposobem odzysku metali szlachetnych jest metoda pirometalurgiczna (rys. 5.10). Zhomogenizowana próbka z dodatkiem innego metalu, pełniącego funkcję wiążącą, jest wypiekana w temperaturze do 2000°C [93]. Metale zawarte w nośnikach doprowadza się do faz skondensowanych lub do fazy gazowej. Proces wypalania odbywa się w piecu indukcyjnym w atmosferze redukującej i ma na celu utlenianie oraz zgazowanie węglowodorów i pozostałych związków organicznych. Produktem końcowym pirolizy jest stop zawierający duże ilości platyny. Powstały strumień gazów

ulega utlenieniu w temperaturze 1000°C. Pomimo dużej skuteczności metody pirometalurgicznej jest ona stosowana rzadziej w porównaniu do metody hydrometalurgicznej. Powodem są duże koszty zakupu instalacji umożliwiającej uzyskanie niezbędnej do przeprowadzenia procesu temperatury oraz wynikająca z tego duża energochłonność [67, 99]. Procesy pirometalurgiczne generują odpady zawierające metale z grupy platynowców (żużel i wyeksploatowane wykładziny pieców), które wymagają ponownego przetworzenia [67].



Rys. 5.10. Schemat etapów odzysku platyny metodą pirometalurgiczną z nośników ceramicznych [99]

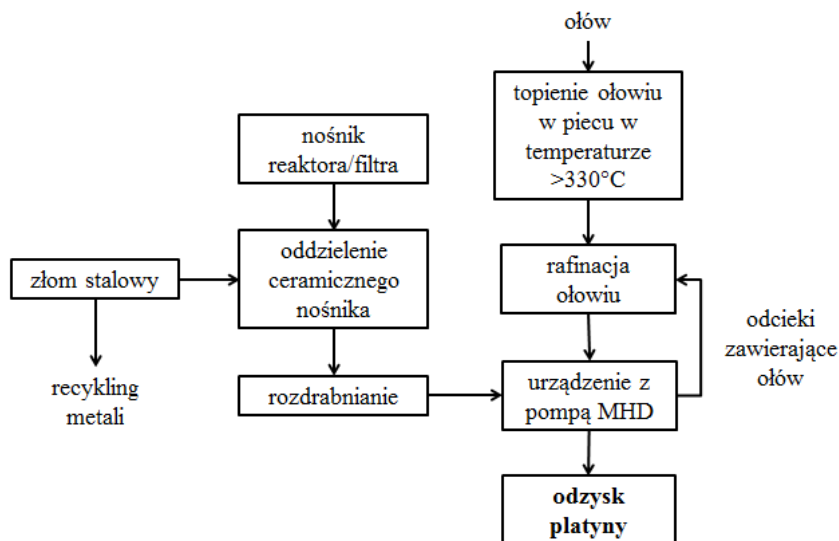
Innowacyjną metodą odzysku platyny z nośników katalitycznych i filtrów cząstek stałych jest proces, w którym wykorzystywana jest pompa magneto hydrodynamiczno-indukcyjna MHD (*Magneto-Hydro-Dynamic Pump*). Magneto hydrodynamika to dział mechaniki płynów badający ruch płynów, które przewodzą prąd elektryczny w polu magnetycznym [20]. Skuteczność metody potwierdzono na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej [20]. Pierwszym etapem jest oddzielenie ceramicznego nośnika od metalowej obudowy, którą przeznaczają się do recyklingu jako złom stalowy. Monolit ceramiczny zostaje rozdrobniony za pomocą kruszarki lub młyna. Powstały materiał transportowany jest do urządzenia zawierającego pompę MHD. Fragmenty nośników mocowane są do pokrywy urządzenia i umieszczone w ciekłym łożu (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Widok urządzenia z pompą MHD: a) pokrywa z przymocowanym nośnikiem, b) wnętrze urządzenia wypełnione ciekłym łożem [20]

Proces polega na wprowadzeniu ciekłego metalu w kanał, wokół którego znajduje się wzbudnik nawinięty na rdzeń wytwarzający pole wirowe [30]. Zaletą metody jest

wykorzystanie obiegu zamkniętego, w którym następuje ponowne wykorzystanie odcieków, co ogranicza powstawanie odpadów w procesie (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Schemat etapów odzysku platyny wykorzystujący pompę magneto hydrodynamiczną [99]

Metoda zakłada płukanie ze stałą prędkością przepływu metalu przez kilkanaście minut. Powoduje ono powstanie prądów wirowych w ciekłym metalu i wypłukiwanie platyny. Metalem wykorzystywanym w procesie jest ołów, który poddany zostaje stopieniu i rafinacji w celu usunięcia zanieczyszczeń (m.in. magnezu, cynku i siarki). Założeniem gwarantującym opłacalność instalacji jest wykorzystywanie urządzenia na skalę przemysłową (kilka sztuk wyeksploatowanych nośników w jednym procesie) [98].

5.2.3. Odzysk materiałów katalitycznych z nośników metalowych

W literaturze światowej przykłady zastosowania metod recyklingu nośników reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych wykonanych z materiałów ceramicznych stanowią zdecydowaną większość w porównaniu z nośnikami metalowymi. Dyrektywa 2000/53/WE dotycząca pojazdów wycofanych z eksploatacji wyznacza ogólne ramy funkcjonowania systemu recyklingu w danym kraju, co pozostawia swobodę w wyborze metod i narzędzi wykorzystywanych do przetwarzania pojazdów i ich elementów [22]. Metody pirometalurgiczna i hydrometalurgiczna znajdują szerokie zastosowanie w przetwarzaniu monolitów ceramicznych. W przypadku nośników metalowych odzysk platynowców może się odbywać z wykorzystaniem urządzenia wyposażonego w pompę magneto hydrodynamiczną opisaną w podrozdziale 5.2.1 [33]. Analogicznie do monolitów ceramicznych, nośniki metalowe zostają rozdrobnione za pomocą dedykowanych niszczarek i młynków, aż do uzyskania pyłu o odpowiedniej średnicy ziaren. Ilustracja przedstawia nośnik metalowy z folii ryflowanej przeznaczony do analizy rentgenowskiej i recyklingu (rys. 5.13) [32]. Analiza zastosowania tej technologii przez różne ośrodki badawcze wskazuje, że nie zawsze przeprowadzany jest etap rozdrabniania nośnika. Monolit umieszczony jest w ciekłym metalu poruszającym się z określoną prędkością. W urządzeniach stosuje się dwa rodzaje pomp. Połączenie pola magnetycznego z przepływem prądu powoduje powstanie siły kierującej ciekły metal wzdłuż osi kanału (w przypadku pompy

kondukcyjnej). W pompie indukcyjnej powstają prądy wirowe, które wywołują różnicę ciśnienia na wlocie i wylocie z filtra, dzięki czemu powstaje siła ssąco-tłocząca [20].



Rys. 5.13. Metalowy nośnik reaktora katalitycznego wykorzystany do analizy rentgenowskiej i recyklingu [32]

Według badań przeprowadzonych przez laboratorium Instytutu Technologii Metali Politechniki Śląskiej wykazano skuteczność metody przez udowodnienie zubożenia zawartości platyny w przetworzonych nośnikach. W Polsce istnieje kilkanaście zakładów zajmujących się skupem i utylizacją wszystkich rodzajów nośników. W celu zapewnienia opłacalności procesu wiele firm deklaruje minimalną liczbę nośników/masę elementów, które należy dostarczyć do utylizacji [121]. Podczas gdy procesy dotyczące nośników ceramicznych są już w pełni uprzemysłowione i ujednolicone, w przypadku ich metalowych odpowiedników trwają prace nad poprawą wydajności i skuteczności wykorzystywanych metod. Niepodważalną zaletą recyklingu nośników metalowych jest stopień ponownego wykorzystania materiałów. Fragmenty zarówno obudowy jak i nośnika, które nie zawierają już metali szlachetnych są odseparowane i poddane recyklingowi [47]. W ostatnich latach odkryto zanieczyszczenie środowiska metalami z grupy platynowców. Jednym z prawdopodobnych źródeł są reaktory katalityczne i filtry cząstek stałych stosowane w motoryzacji. Ceramiczne nośniki poddawane są działaniu dużej temperatury, zmianom warunków utleniająco-redukujących oraz mechanicznemu ścieraniu. Skutkuje to naruszeniem struktury monolitu i przedostawaniem się fragmentów nośnika wraz z gazami wylotowymi do środowiska [93]. Istnieje prawdopodobieństwo częściowego wyeliminowania przedostawania się metali PGM do środowiska przez stosowanie metalowych nośników katalitycznych, które cechują się większą wytrzymałością mechaniczną i odpornością na szybkie zmiany temperatury w układzie wylotowym.

5.3. Analiza możliwości ponownego wykorzystania materiałów tworzących nośnik

Po zakończeniu eksploatacji reaktory katalityczne i filtry cząstek stałych najczęściej usuwane są z pojazdów w warsztatach lub w stacjach demontażu pojazdów, zbierane i wysyłane do odpowiednich zakładów w celu recyklingu. Głównym celem jest odzysk metali szlachetnych, z uwagi na ich cenę. Wtórny założeniem jest ponowne wykorzystanie komponentów metalowych do produkcji stali. W 2020 r. nastąpiło duże zmniejszenie odzysku platyny z wyeksploatowanych reaktorów katalitycznych i nośników filtrów w porównaniu z palladem i rodem [16]. Autorzy publikacji uważają, że nadano priorytet

odzyskowi katalizatorów palladowo-rodowych o wyższej cenie, których technologia obróbki wymaga mniejszego nakładu energii. Nośniki ceramiczne wykonane z węgla krzemu są określone jako trudne w obróbce, ponieważ większość rafinerii posiada ograniczone możliwości zmniejszania zawartości węgla do akceptowalnego poziomu. Obróbka wymaga mieszania pyłów w małych ilościach z innymi materiałami, co wpływa na zwiększenie energochłonności [16].

Możliwość odzysku elementów z filtrów z nośnikiem ceramicznym jest ograniczona, ponieważ nośnik ulega zmieleniu, a powstały pył nie może być wykorzystany ponownie. W przypadku filtrów wyposażonych w nośnik metalowy istnieją alternatywne metody recyklingu (pomijające etapy rozdrabniania i mielenia nośnika, opisane w podrozdziale 5.2.3), które stwarzają możliwość ponownego przetworzenia materiału nośnika, w przeciwieństwie do ich ceramicznych zamienników. Dowodzi to istnienie możliwości potencjalnego zmniejszenia energochłonności całego procesu produkcyjnego.

6. Cel i zakres pracy

W ramach dysertacji poruszono problem zastąpienia nośników ceramicznych, powszechnie stosowanych w motoryzacji, nośnikami metalowymi w filtrach cząstek stałych przeznaczonych do silników SI DI. Genezą podjęcia zagadnienia była możliwość uzyskania skuteczności filtracji PM na takim samym lub wyższym poziomie jak w filtrach z nośnikiem ceramicznym. Realizację celu rozprawy doktorskiej umożliwiła współpraca z podmiotem gospodarczym, w ramach projektu naukowo-badawczego dotyczącego opracowania filtra cząstek stałych do silników SI DI, który jest producentem pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych różnego rodzaju, przy zastosowaniu nośników wykonywanych z folii metalowych.

Problemem badawczym było opracowanie geometrii kanału w nośniku metalowym umożliwiającej filtrację i porównywalną skuteczność w stosunku do filtra z nośnikiem ceramicznym. Rozwiązanie tego problemu podzielono na dwa etapy. Pierwszy dotyczył opracowania koncepcji kształtu kanału, drugi to sprawdzenie koncepcji z wykorzystaniem prac symulacyjnych w środowisku Ansys. Wyniki z tej części pracy posłużyły do wykonania nośników metalowych z opracowaną geometrią kanałów. Dla sprawdzenia koncepcji nośniki metalowe przeznaczone do filtracji PM oparto na trzech wariantach. Każdy z nich zakładał inny mechanizm ograniczania emisji PM_m i PN z uwzględnieniem odpowiedniej skuteczności względem pozostałych związków toksycznych gazów wylotowych. Opracowywany filtr stanowił element systemu pozasilnikowego układu oczyszczania gazów wylotowych, a nie indywidualną konstrukcję skoncentrowaną tylko na ograniczaniu PM_m i PN. Takie podejście do rozwiązania problemu badawczego było podyktowane ogólnościowym trendem badań i rozwoju pozasilnikowych układów/systemów oczyszczania gazów wylotowych i cząstek stałych.

Problemem konstrukcyjnym było wykonanie opracowanej struktury nośnika, a dokładniej jego kanałów umożliwiających wykorzystanie zjawisk fizycznych oraz własności chemicznych warstw katalitycznych do utleniania PM w zakresie emisji ich masy i liczby. Do wykonania zakładanej konstrukcji nośnika wykorzystano technologię perforacji folii metalowej w trzech konfiguracjach: o stałych na całym przekroju poprzecznym perforacjach zmiennych rosnąco, podzielonych na dwa odcinki na długości nośnika oraz perforacjach podzielonych na trzy odcinki na długości nośnika metalowego. Poszczególne odcinki charakteryzowały się zmiennymi własnościami fizykochemicznymi. Głównie dotyczyło to kształtu perforacji oraz wypełnienia nośnika warstwami katalitycznymi.

Część utylitarna pracy to ograniczenie emisji gazów cieplarnianych czyli wykazanie zasadności stosowania nośnika metalowego, zamiast ceramicznego, w zakresie zapotrzebowania energetycznego, eksploatacji oraz recyklingu filtra GPF z nośnikiem metalowym. Powodem tego, na wstępnym etapie pracy, była koncepcja, że zdecydowanie łatwiejsze i mniej energochłonne jest przetworzenie/recykling elementów składającego się głównie z części metalowych filtra w porównaniu z częściami filtra ceramicznego, których wytworzenie wymaga większej liczby procesów technologicznych.

Na podstawie tego założenia sformułowano główny cel pracy:

Zaprojektowanie i wytworzenie filtra cząstek stałych do silników SI DI z nośnikiem metalowym stanowiącym zamiennik dla nośników ceramicznych oraz weryfikacja jego skuteczności

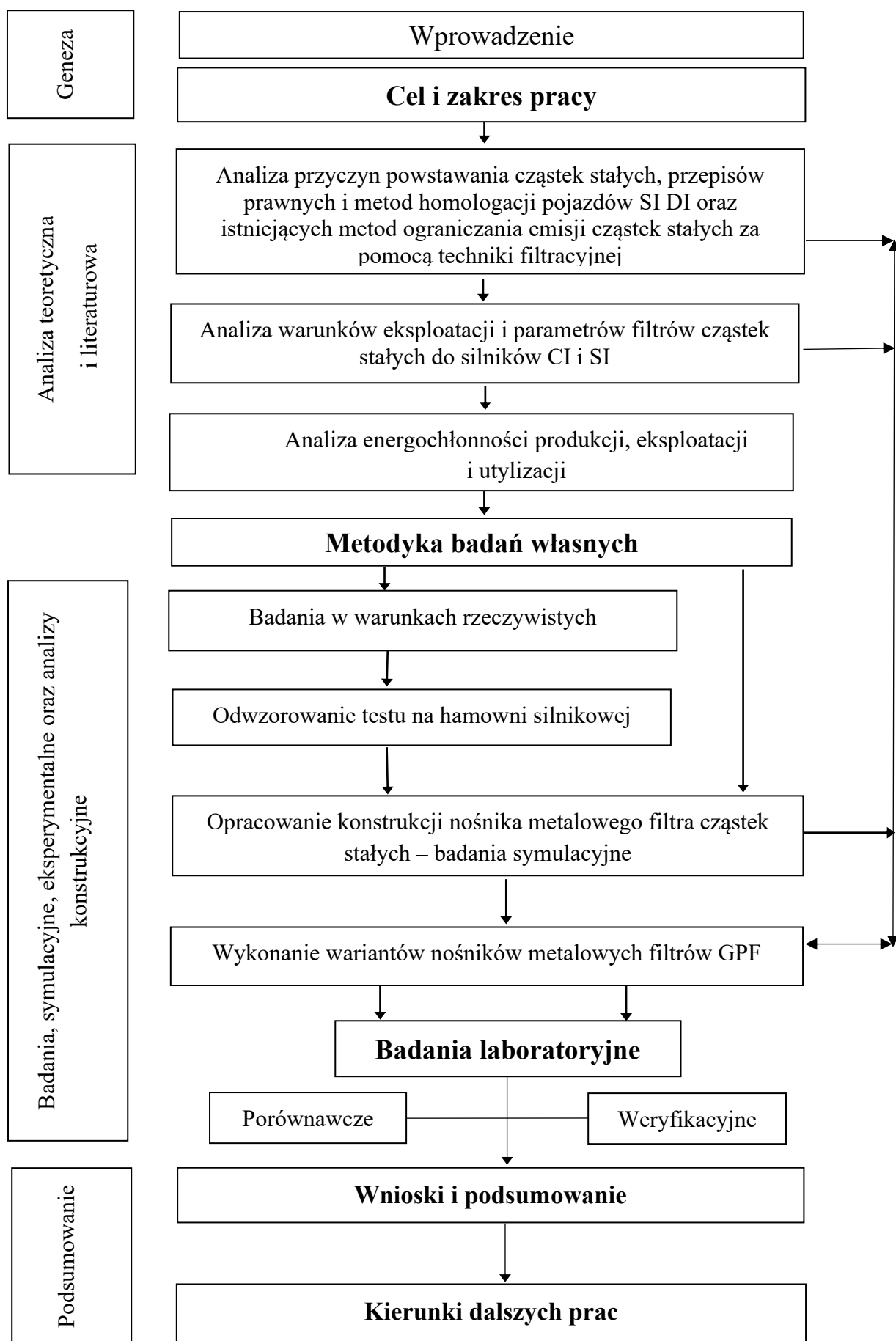
Cele szczegółowe:

- dostosowanie dostępnych metod badawczych określających poziom emisji szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych do badań przeprowadzonych podczas realizacji rozprawy doktorskiej,
- badania emisji poszczególnych składników gazów wylotowych metodą RDE w celu odwzorowania testu na stanowisku hamulcowym,
- badania na dynamicznym stanowisku hamulcowym w odwzorowanych cyklach jezdnych (miejskim, pozamiejskim i autostradowym),
- weryfikacja skuteczności poszczególnych konfiguracji badawczych w odwzorowanym teście,
- porównanie skuteczności dostępnych rozwiązań komercyjnych z prototypowymi konfiguracjami układów oczyszczania gazów wylotowych.

Zdefiniowano następującą tezę:

Nośnik metalowy stanowi zamiennik nośnika ceramicznego do ograniczania emisji PM_m i PN z wykorzystaniem innych mechanizmów filtracji niż przepływ przez ściankę (*wall-flow*)

Uzasadniona konieczność udoskonalania systemów oczyszczania gazów wylotowych wymaga od producentów i konstruktorów pojazdów opracowania rozwiązania stanowiącego kompromis pomiędzy sprawnością elementu układu oraz kosztami jego wytworzenia. Wytworzenie nośnika metalowego o autorskiej geometrii kanałów i potwierdzenie skuteczności działania przez wykonanie badań rzeczywistego układu wylotowego stanowić będzie potwierdzenie osiągnięcia głównego celu naukowego rozprawy. Strukturę pracy z wyszczególnionymi problemami badawczymi przedstawiono na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Struktura pracy

7. Metodyka badań

7.1. Opis obiektów użytych do badań

Obiektem wykorzystanym do badań w warunkach rzeczywistych był pojazd wyposażony w silnik SI DI o objętości skokowej 1197 cm³ (tab. 7.1). Pojazd przedstawiono na rys. 7.1. Do badań na hamowni silnikowej wykorzystano jednostkę o tożsamy danych technicznych.

Tabela 7.1. Podstawowe dane techniczne pojazdu

Rok produkcji	2015
Rodzaj zapłonu	SI
Objętość skokowa [cm ³]	1197
Liczba cylindrów/zaworów	4/16
Układ cylindrów	rzędowy
Typ wtrysku	bezpośredni
Moc maksymalna [kW]	77
Maksymalny moment obrotowy [N·m]	160
Skrzynia biegów	automatyczna

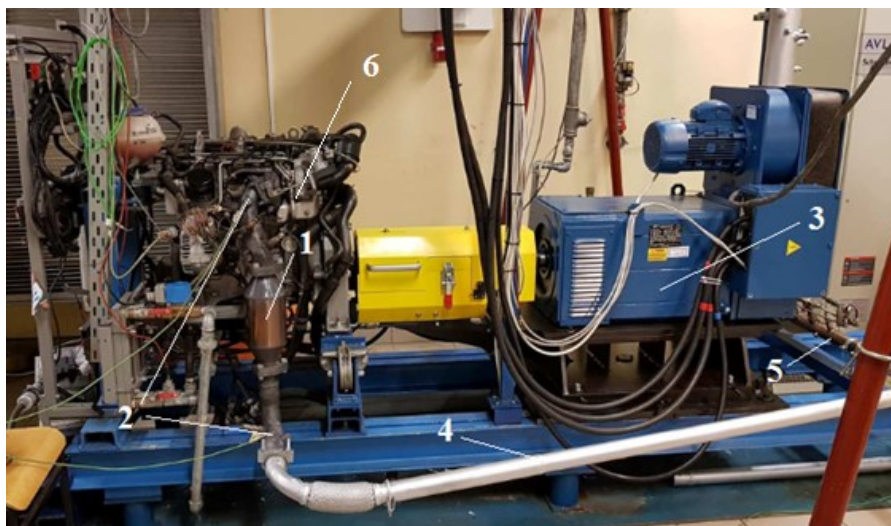


Rys. 7.1. Pojazd stanowiący obiekt badań w warunkach rzeczywistych

Badane konfiguracje układów oczyszczania gazów wylotowych montowano za silnikiem spełniającym normę emisji Euro 5. Do obciążenia silnika wykorzystano dynamiczne stanowisko hamulcowe firmy AUTOMEX (rys. 7.2). Hamownia charakteryzuje się krótkim czasem przesterowania (zmiany obciążenia), przez co możliwe jest odtworzenie wcześniej zarejestrowanego testu, a także odwzorowanie hamowania silnikiem, który napędzany jest przez jednostkę elektryczną (tab. 7.2).

Tabela 7.2. Dane techniczne hamowni wykorzystanej do badań [110]

Moc [kW]	200
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	2000
Maksymalna prędkość obrotowa [obr/min]	18000
Masa hamulca [kg]	400
Czynnik chłodzący hamulec	powietrze
Kierunek obrotów hamulca	dowolny



Rys. 7.2. Stanowisko badawcze: 1 – filtr cząstek stałych, 2 – punkty pomiaru temperatury, 3 – silnik elektryczny hamowni dynamicznej, 4 – układ wylotowy, 5 – przepływomierz gazów wylotowych, 6 – silnik spalinowy spełniający wymagania normy Euro 5

Obiektami stanowiącymi przedmiot realizacji rozprawy doktorskiej było 5 elementów układu oczyszczania gazów wylotowych, w tym 3 trójfunkcyjne reaktory katalityczne i 2 filtry cząstek stałych w różnych konfiguracjach (tab. 7.3). Zaprojektowane konfiguracje obejmowały dwa warianty rozmieszczenia elementów. W zależności od badanej konfiguracji na stanowisku silnikowym umieszczone były jeden lub dwa elementy (rys. 7.8a–b).

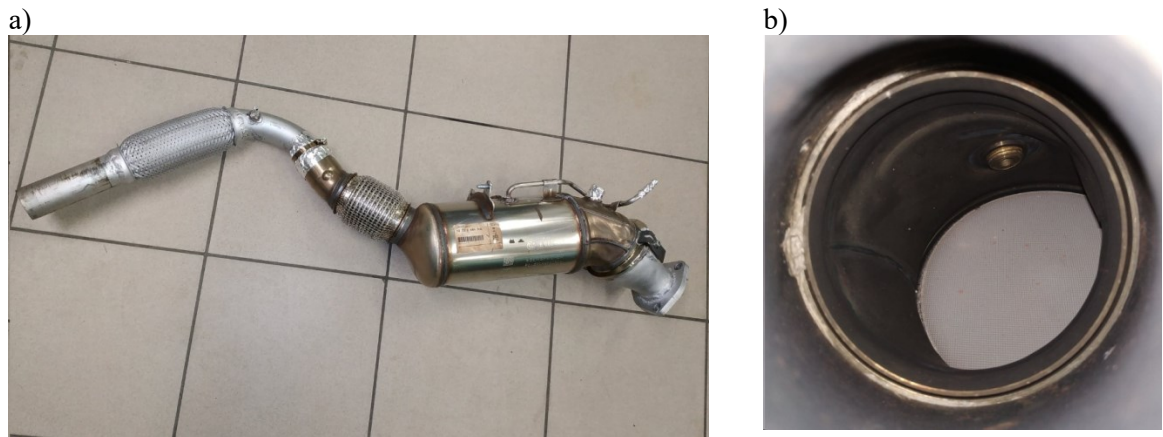
Tabela 7.3. Konfiguracje układów oczyszczania gazów wylotowych wykorzystane do badań

Lp.	Liczba elementów	Rozkład elementów	Liczba CPSI	Rodzaj konfiguracji	Materiał nośnika	Rysunek
1	1	TWC	200	komercyjna	ceramika	7.3
2	1	GPF/TWC	400			7.4
3	1	GPF/TWC	200	prototypowa	metal	7.5
4	2	TWC + GPF/TWC	400 + 200			7.6
5	2	TWC + GPF/TWC	200 + 200			7.7

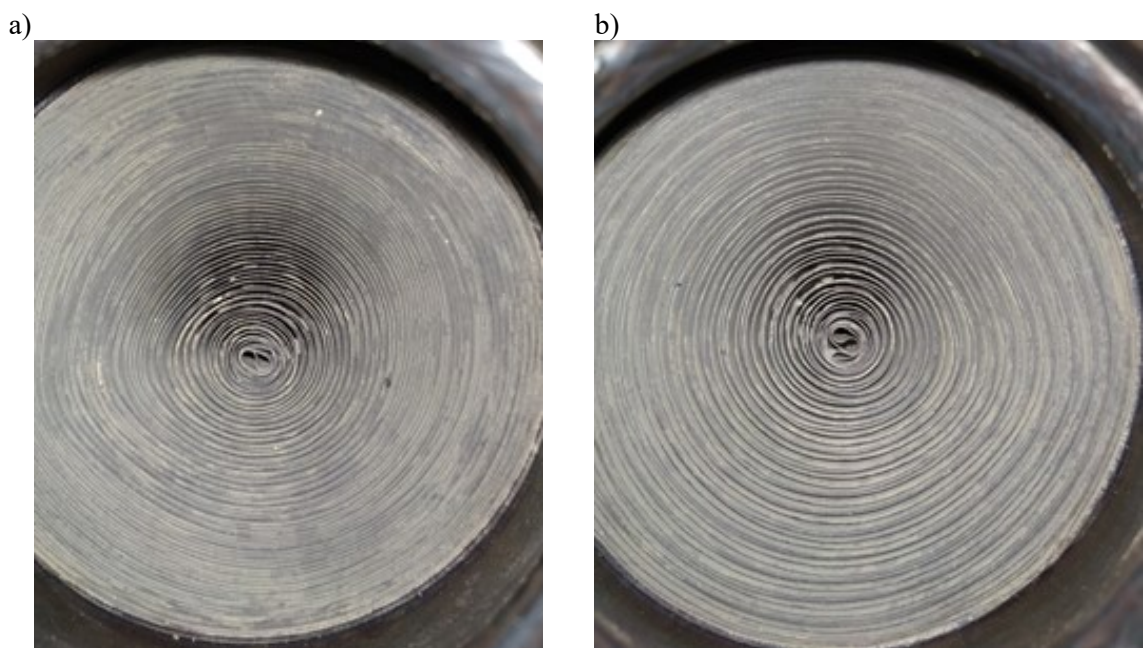
GPF/TWC – filtr cząstek stałych pokryty katalitycznie



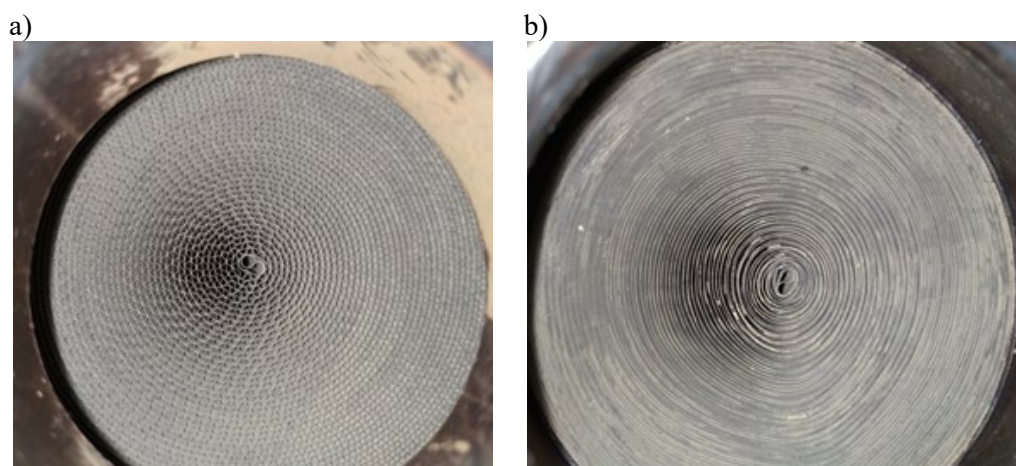
Rys. 7.3. Komercyjny reaktor TWC z nośnikiem ceramicznym



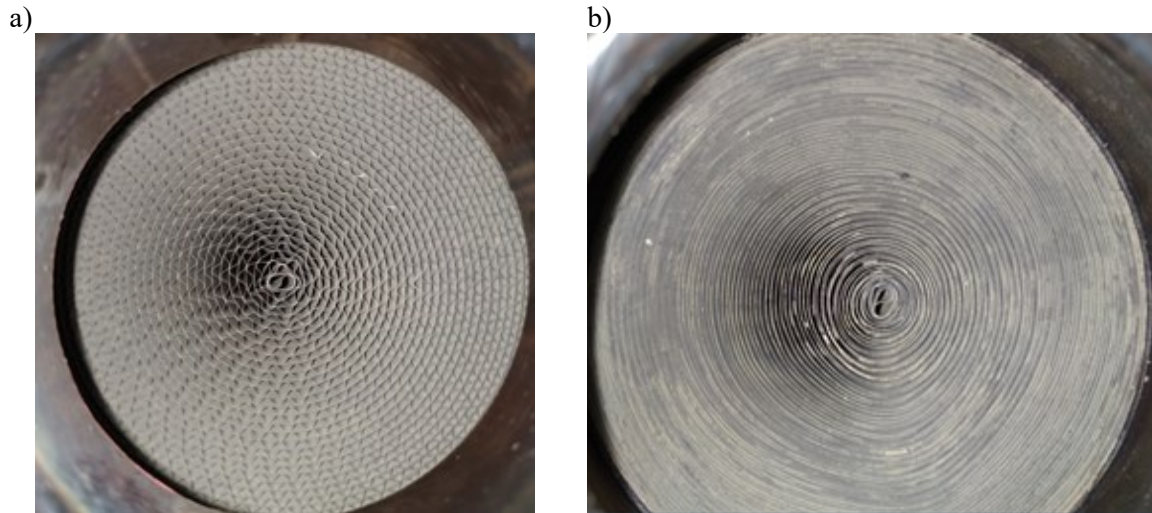
Rys. 7.4. Komercyjny GPF/TWC z nośnikiem ceramicznym: a) widok filtra, b) wlot filtra



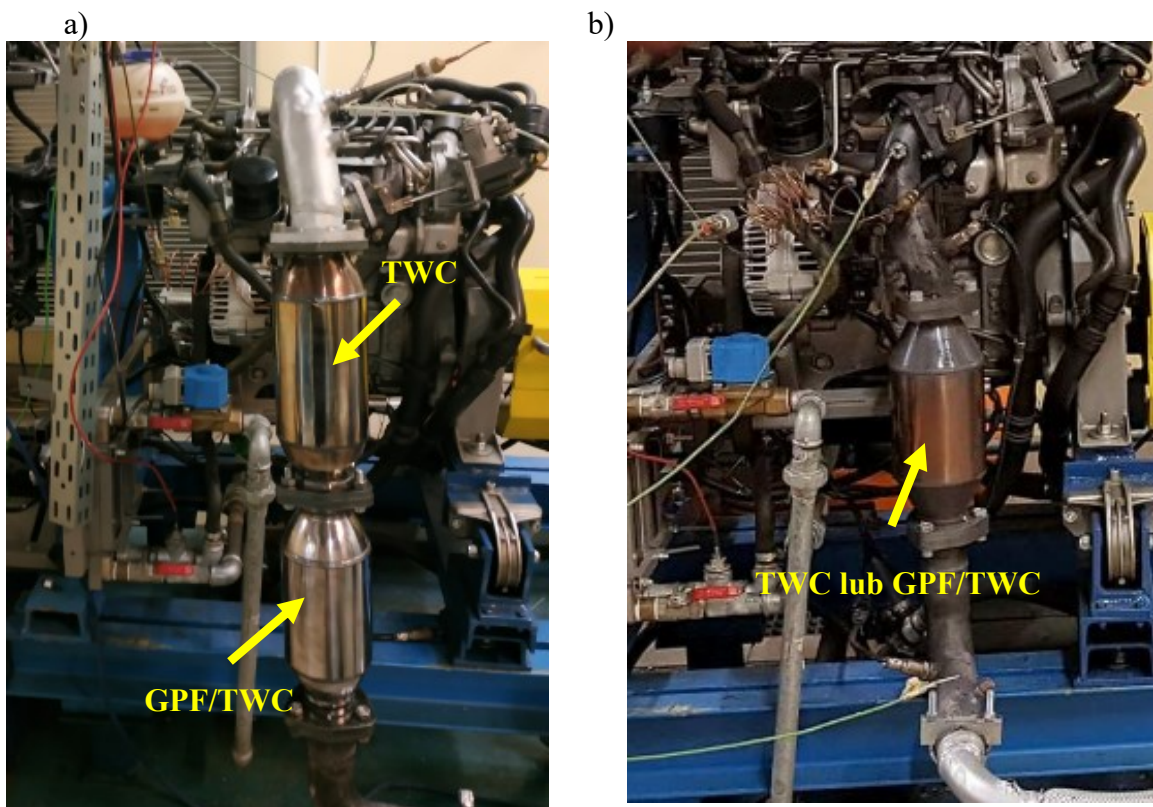
Rys. 7.5. Prototypowy GPF/TWC z nośnikiem metalowym: a) wlot, b) wylot



Rys. 7.6. Wloty prototypowych filtrów: a) TWC 400 CPSI z nośnikiem metalowym, b) GPF/TWC z nośnikiem metalowym

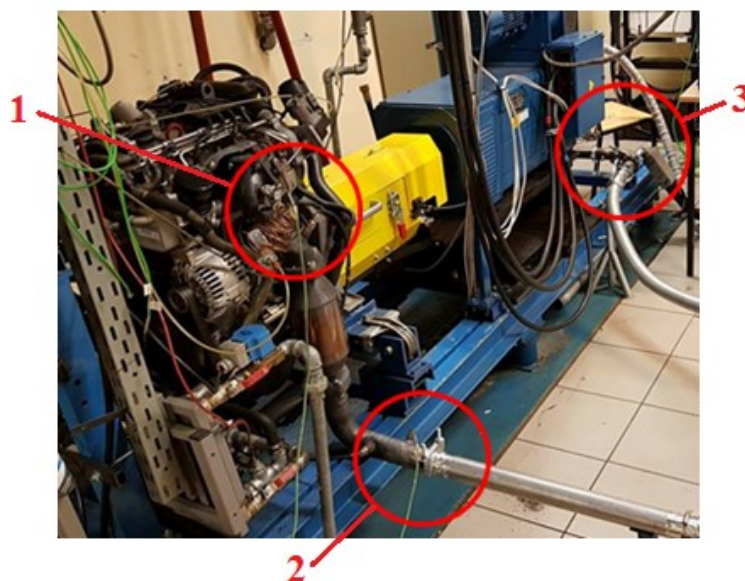


Rys. 7.7. Wloty nośników: a) TWC 200 CPSI, b) prototypowy GPF /TWC z nośnikiem metalowym



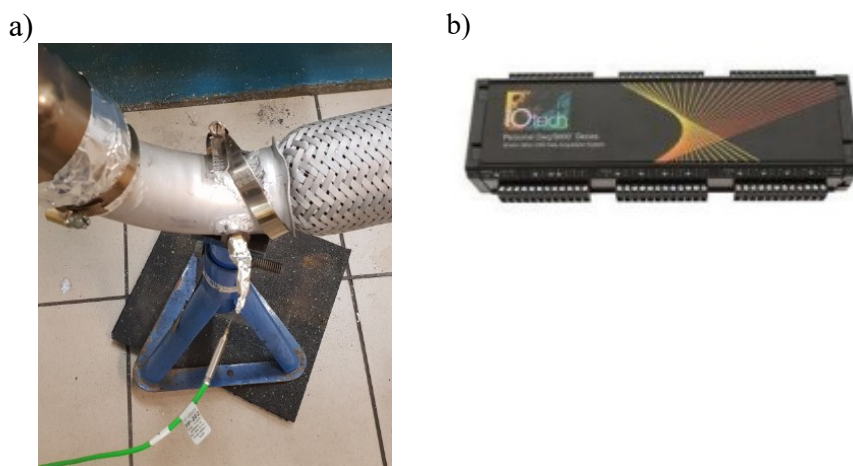
Rys. 7.8. Rozmieszczenie elementów układu wylotowego w zależności od badanej konfiguracji: a) reaktor TWC+GPF/TWC, b) TWC lub GPF/TWC

Najważniejszym parametrem termodynamicznym wpływającym na sprawność filtracji przez utlenianie jest temperatura gazów wylotowych. Wytypowano trzy punkty, w których dokonano pomiaru: przed TWC/GPF, za TWC/GPF oraz wewnątrz przepływomierza gazów wylotowych (rys. 7.9). Określenie temperatury przed i za układem umożliwia ocenę wpływu poszczególnych konfiguracji na szybkość nagrzewania materiału nośnika, a tym samym osiągnięcia warunków pracy niezbędnych do zachodzenia reakcji utleniania i redukcji składników gazów wylotowych.



Rys. 7.9. Rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury: 1 – przed GPF/TWC, 2 – za GPF/TWC, 3 – w przepływomierzu gazów wylotowych

Pomiary wykonano czujnikami termoelektrycznymi (termopary) firmy Czaki (rys. 7.10a). Termopary umożliwiają rejestrowanie wartości w przedziale od -40°C do 1100°C z dokładnością $\pm 0,5\%$. Dane z czujnika przekazywane są za pomocą przetwornika sygnału Iotech Personal DAQ 3000 do komputera, który dokonuje zapisu z określoną częstotliwością (rys. 7.10b). Pomiar temperatury z wykorzystaniem zastosowanych termopar opiera się na zjawisku Seebecka. Polega ono na powstawaniu siły elektromotorycznej w przypadku różnicy temperatury pomiędzy spoiną pomiarową, a spoiną odniesienia utrzymywaną w stałej temperaturze. Poziom napięcia [mV] jest proporcjonalny względem różnicy temperatury między spoinami [117].



Rys. 7.10. Urządzenia wykorzystane do pomiaru temperatury na stanowisku badawczym: a) czujnik temperatury firmy Czaki, b) przetwornik sygnału Iotech Personal DAQ 3000

Pomiar masowego natężenia przepływu dokonano za pomocą przepływomierza SEMTECH EFM-HS (*High-Speed Exhaust Flow Meter*) będącego częścią zestawu pomiarowego gazowych składników gazów wylotowych (rys. 7.11). Dane techniczne przepływomierza przedstawiono w tabeli 7.4. Zasada działania przepływomierza opiera się na prawie Bernoulliego i ciągłości przepływu przez wykorzystanie czterech

przetworników różnicy ciśnienia z dwoma zakresami wzmacnienia. Przetworniki działają w sposób ciągły z częstotliwością do 2,5 kHz, wykonując pomiar dla każdego impulsu ciśnienia z silnika.



Rys. 7.11. Przepływomierz natężenia gazów wylotowych wykorzystany do badań

Tabela 7.4 Dane techniczne przepływomierza SEMTECH EFM-HS [122]

Parametr	Wartość	
Zakres temperatury gazów wylotowych	-5-700°C	
Dokładność pomiaru temperatury	±1% lub ±2°C	
Dokładność pomiaru natężenia przepływu	±2%	
Czas nagrzewania	< 5 min w temperaturze otoczenia 20°C	
Czas odpowiedzi systemu	< 2ms	
Częstotliwość pomiaru	5 Hz	
Dostępne opcje wyboru średnicy	1 cal / 25,1 mm	3 cale / 76,2 mm
	1,5 cala / 38,1 mm	4 cale / 101,6 mm
	2 cale / 50,8 mm	5 cali / 127 mm
	2,5 cala / 63,5 mm	6 cali / 152,4 mm

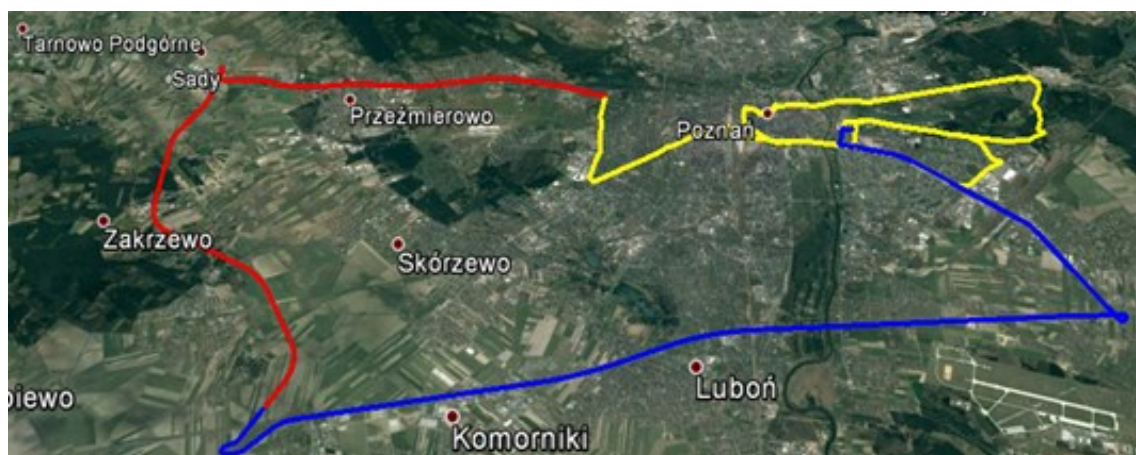
7.2. Badania w warunkach rzeczywistych

Oceny zawartości związków toksycznych i szkodliwych w gazach wylotowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji dokonuje się zgodnie z procedurą RDE. Zakłada ona uwzględnienie czynników zewnętrznych, takich jak warunki atmosferyczne, wpływ stylu jazdy kierowcy, czy kongestia. Powoduje to zróżnicowanie emisji szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych w porównaniu do badań laboratoryjnych. Celem wykonanych badań w warunkach rzeczywistych było zarejestrowanie parametrów pracy silnika, które następnie odwzorowano na dynamicznym stanowisku

hamulcowym. Przejazdy przeprowadzono zgodnie z wytycznymi procedury, według której zaprojektowano trasę zawierającą odcinki o dopuszczalnych prędkościach poruszania się po drogach charakterystycznych dla jazdy miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej (tab. 7.5). W celu spełnienia wymagań procedury, każda z części musi stanowić 33% całości trasy. Największa różnica w liczbie kilometrów pomiędzy odcinkami wynosi 7 km. Podział trasy uwarunkowano topografią aglomeracji poznańskiej i dostępem do dróg o określonych parametrach użytkowania. Najdłuższy odcinek stanowił cykl miejski, który jest najważniejszy z uwagi na bezpośredni wpływ zanieczyszczenia powietrza na mieszkańców tego obszaru. Na jego terenie występuje największe prawdopodobieństwo kongestii, największa liczba zatrzymań i przyspieszeń. Obejmował częściowo obszar centrum miasta, dzielnicy Śródka, Chartowo, Osiedla Warszawskiego i Małty. Cykl pozamiejski charakteryzowała najmniejsza liczba kilometrów. Trasa przebiegała w pobliżu miejscowości Przeźmierowo, Sady i Zakrzewo drogą 92, a następnie S11. Cykl autostradowy rozpoczął się od węzła Poznań Zachód. Zjazd z autostrady nastąpił węzłem Poznań Krzesiny (rys. 7.12).

Tabela 7.5. Charakterystyka trasy wykorzystanej do badań w warunkach rzeczywistych

Cykl jezdny	Prędkość dopuszczalna	Oznaczenie	Dystans
miejski	60 km/h	kolor żółty	30 km
pozamiejski	90 km/h	kolor czerwony	23 km
autostradowy	140 km/h	kolor niebieski	29 km



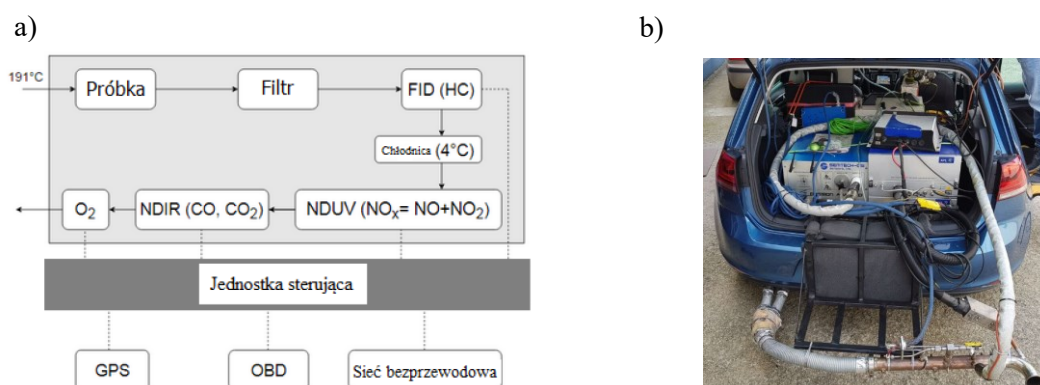
Rys. 7.12. Trasa RDE wykorzystana do badań, obejmująca odcinki: miejski (kolor żółty, pozamiejski (kolor czerwony), autostradowy (kolor niebieski) [118]

Do analizy gazowych składników gazów wylotowych wykorzystano aparaturę SEMTECH DS (*Sensors Emissions Technology*) firmy Sensors należąca do grupy PEMS (*Portable Emissions Measurement System*). Urządzenie zawiera analizatory dedykowane określonym szkodliwym i toksycznym składnikom gazów wylotowych (rys. 7.13a). Pomiar zawartości CO₂ i CO odbywa się za pomocą analizatora NDIR (*Non-Dispersive Infrared*) wykorzystującego zjawisko podczerwieni. Do określenia stężenia NO_x urządzenie wykorzystuje analizator NDUV (*Non-Dispersive Ultraviolet*). Stężenie O₂ wyznacza analizator elektrochemiczny. Szczegóły dotyczące zakresu i dokładności pomiarów przedstawiono w tabeli 7.6.

Tabela 7.6. Charakterystyka analizatora SEMTECH DS firmy Sensors [122]

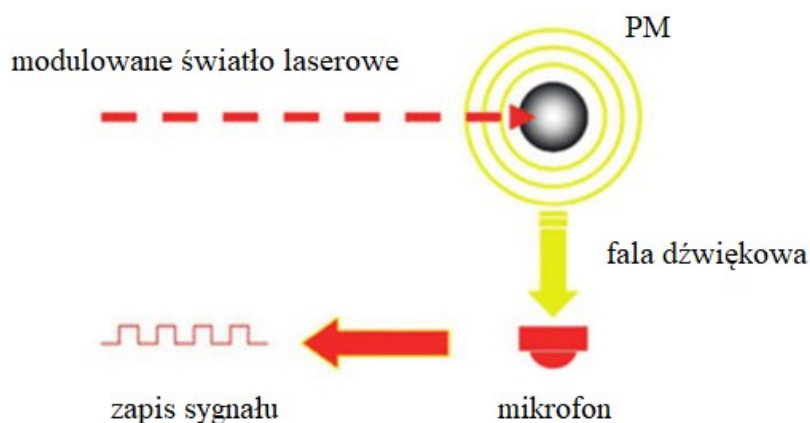
Parametr	Dane techniczne	Dokładność
Stężenie związków w gazach wylotowych		
CO	NDIR, zakres 0–10%	±3% zakresu pomiaru
HC	FID, zakres 0–10000 ppm	±2,5% zakresu pomiaru
NO _x =(NO+ NO ₂)	NDUV, zakres 0–3000 ppm	±3% zakresu pomiaru
CO ₂	NDIR, zakres 0–20%	±3% zakresu pomiaru
O ₂	PMD, zakres 0–20%	±1% zakresu pomiaru
Przepływ gazów wylotowych	masowe natężenie przepływu	±2,5% zakresu pomiaru
Czas nagrzewania	900 s	
Systemy diagnostyczne	OBD, OBD-2	

Zawartość węglowodorów mierzona jest analizatorem FID (*Flame Ionization Detector*) wykorzystującym wodór jako paliwo, dlatego konieczne jest odpowiednie zabezpieczenie wszystkich elementów umieszczonych w pojeździe połączonych z urządzeniem i potwierdzenie szczelności układu (rys. 7.13b).



Rys. 7.13. Analizator SEMTECH DS firmy Sensors: a) schemat działania urządzenia pomiarowego, b) widok aparatury zamontowanej w pojeździe

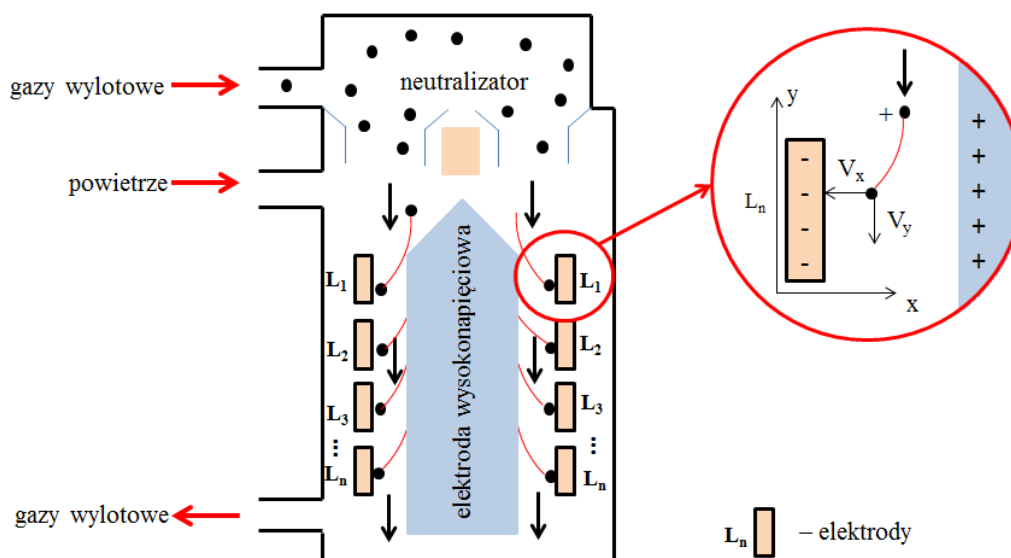
Przed przystąpieniem do przejazdów testowych aparaturę skalibrowano gazami wzorcowymi według wytycznych producenta. Aby uniezależnić wyniki badań od zanieczyszczenia tła, aparaturę wyzerowano w powietrzu otoczenia. Pomiar stężenia PM_m dokonano analizatorem MSS (*Micro Soot Sensor*) firmy AVL. Działanie AVL MSS opiera się na metodzie PAS (*Photo Acoustic Soot Sensor*) [111]. Dla nierozcieńczonych gazów wylotowych zakres pomiarowy urządzenia wynosi 0,005–50 mg/m³ (tab. 7.7). PM poddawane są promieniowaniu światłem modulowanym, czego wynikiem jest ich okresowe nagrzewanie i chłodzenie. Powoduje to zmianę objętości badanego gazu nośnego, który działa jak fala dźwiękowa. Urządzenie wyposażone jest w mikrofony dostosowane do określonego zakresu częstotliwości i amplitud drgań. Powietrze nie generuje sygnału dźwiękowego, natomiast pojawia się on wraz ze zwiększeniem stężenia PM w gazach wylotowych (rys. 7.14). Pomiar PN wykonano spektrometrem masowym EEPS 3090 (*Engine Exhaust Particle Sizer*) firmy TSI. Wyniki służą do stworzenia rozkładu wymiarowego cząstek dla wielkości od 5,6 do 560 nm (tab. 7.8) [125]. Pomiar zakresu średnic odbywa się przez zmianę zakresu aktywności elektrycznej cząstek (rys. 7.15).



Rys. 7.14. Zasada działania urządzenia do pomiaru stężenia PM przez AVL MSS [65]

Tabela 7.7. Dane techniczne AVL MSS [111]

Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy	0,005–50 mg/m ³
Szybkość transmisji danych	cyfrowa: do 5 Hz / analogowa: do 100 Hz
Warunki pracy	5–43°C; wilgotność 0–95%
Przepływ próbki gazów wylotowych	2 + 2 dm ³ /min (całość ~ 4 dm ³ /min)
Interfejsy	RS232, Digital I/O, Analog I/O, Ethernet
Temperatura gazów wylotowych	do 1000°C
Ciśnienie pośrednie gazów wylotowych	do 2000 mbar
Pulsacje ciśnienia	±1000 mbar (max. 50% ciśnienia wstecznego)



Rys. 7.15. Zasada działania urządzenia do określania rozkładu wymiarowego cząstek stałych EEPS TSI 3090 [125]

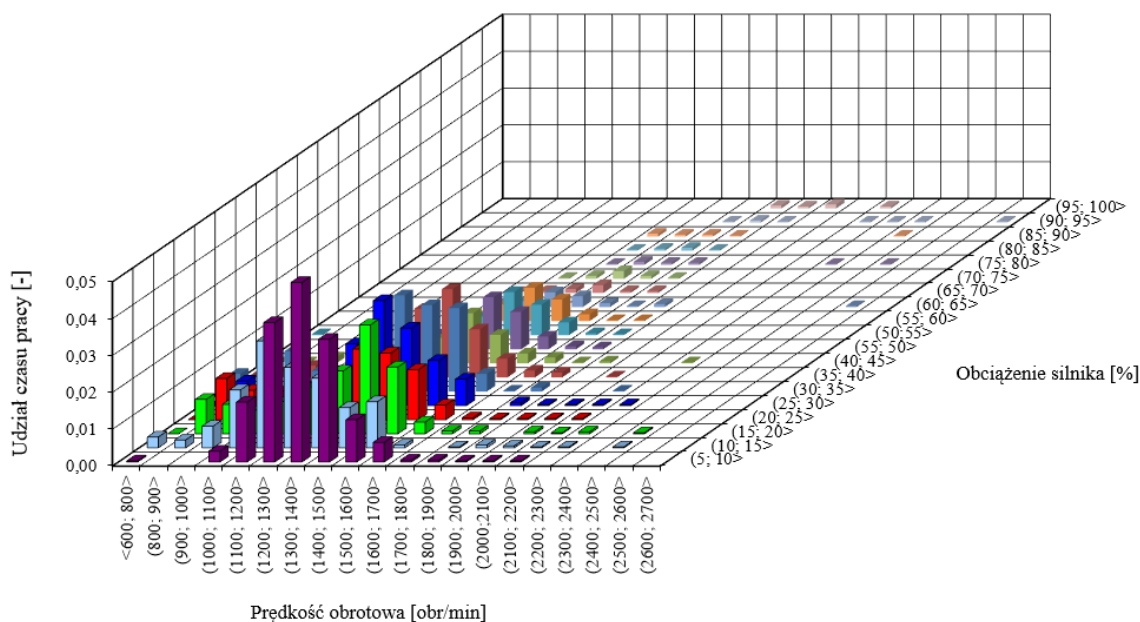
Tabela 7.8. Dane techniczne aparatury TSI EEPS [125]

Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy	5,6÷560 nm
Liczba elektrod	22
Częstotliwość odczytu	10 Hz
Przepływ próbki gazów wylotowych	10 dm ³ /min
Przepływ sprężonego powietrza	40 dm ³ /min
Temperatura próbki wejściowej	10–52°C

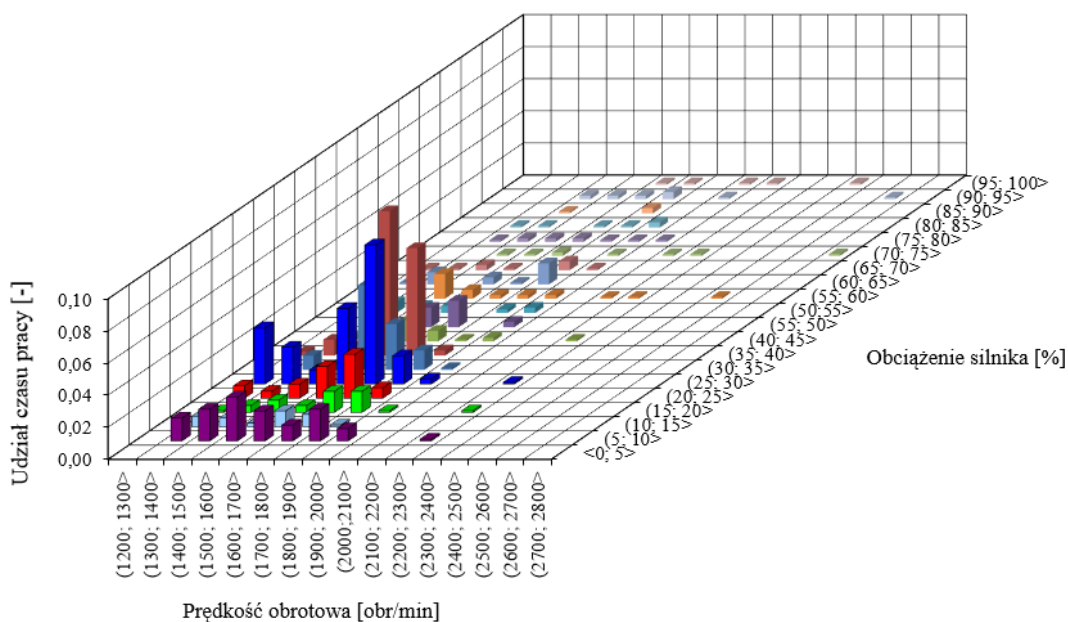
Prędkość ruchu cząstek jest zróżnicowana i przypisana do ich średnicy i masy. Gazy wylotowe przepływają przez układ rozcieńczający i utrzymujący temperaturę odpowiednią do wykonania pomiarów. Zakres pomiarowy zakłada pomiar cząstek o średnicy do 560 nm, dlatego cząstki o większej średnicy zostają wychwycone przez filtr wstępny. Gazy wylotowe są kierowane przez neutralizator na elektrodę ładującą. Wartość skumulowanego ładunku umożliwia klasyfikację PM według średnicy. Cząstki trafiają na szczelinę utworzoną przez przestrzeń pomiędzy dwoma cylindrami, które otacza powietrze doprowadzone z zewnątrz. Pole elektryczne pomiędzy cylindrami odpycha cząstki od elektrody naładowanej dodatnio. Kolejnym etapem jest akumulacja cząstek na elektrodach zewnętrznych. Podczas uderzania cząstek o elektrody wytwarza się prąd rejestrowany przez układ pomiarowy [111].

7.3. Odzworowanie testu rzeczywistego na hamowni silnikowej

Na podstawie badań RDE opracowano autorski test, którego założeniem było uproszczenie i skrócenie procedury badawczej wykonywanej w warunkach rzeczywistych do badań z wykorzystaniem hamowni silnikowej. Test podzielono na 3 cykle odpowiadające podziałowi uwzględnionemu w procedurze RDE. Określono korelację między zużyciem paliwa a emisją CO₂. Uzyskany wynik ($0,975 < R^2 < 0,985$) uznano za wystarczający do odzwierciedlenia punktów pracy w warunkach rzeczywistych za pomocą hamowni silnikowej. Na podstawie charakterystyk gęstości czasowych wybrano 5 najczęściej występujących punktów pracy silnika dla każdego cyklu (tab. 7.9). Pracę na biegu jałowym uwzględniono jako dodatkowy punkt w cyklu miejskim. Oprogramowanie komputerowe umożliwiło wprowadzenie danych zawierających punkty pracy i odtworzenie ich za pomocą jednostki sterującej hamowni dynamicznej. Zgodnie z normą parametry w każdym z trzech cykli są ściśle określone przez czas, w którym pojazd porusza się z prędkością równą bądź mniejszą niż 60 km/h dla cyklu miejskiego, pomiędzy 60 a 90 km/h dla cyklu pozamiejskiego oraz od 90 do 140 km/h dla cyklu autostradowego. Każdy z cykli charakteryzuje się innymi warunkami jazdy, liczbą przyspieszeń oraz hamowań. W cyklu miejskim występuje większe ryzyko kongestii. Każdy z cykli testu RDE został przeanalizowany pod względem występowania punktów pracy przy przyjętych przedziałach prędkości obrotowej wału korbowego silnika ± 200 obr/min. Na rys. 7.16–7.18 pokazano udział czasu pracy w poszczególnych przedziałach. Podczas cyklu miejskiego występuje dominacja małych prędkości obrotowych przy obciążeniu silnika w przedziale 5–15% co świadczyć może o długich okresach pracy silnika na biegu jałowym (rys. 7.16). W cyklu pozamiejskim największy udział czasu pracy przypada na obciążenie silnika w zakresie 30–45% i 1300–2000 obr/min (rys. 7.17).

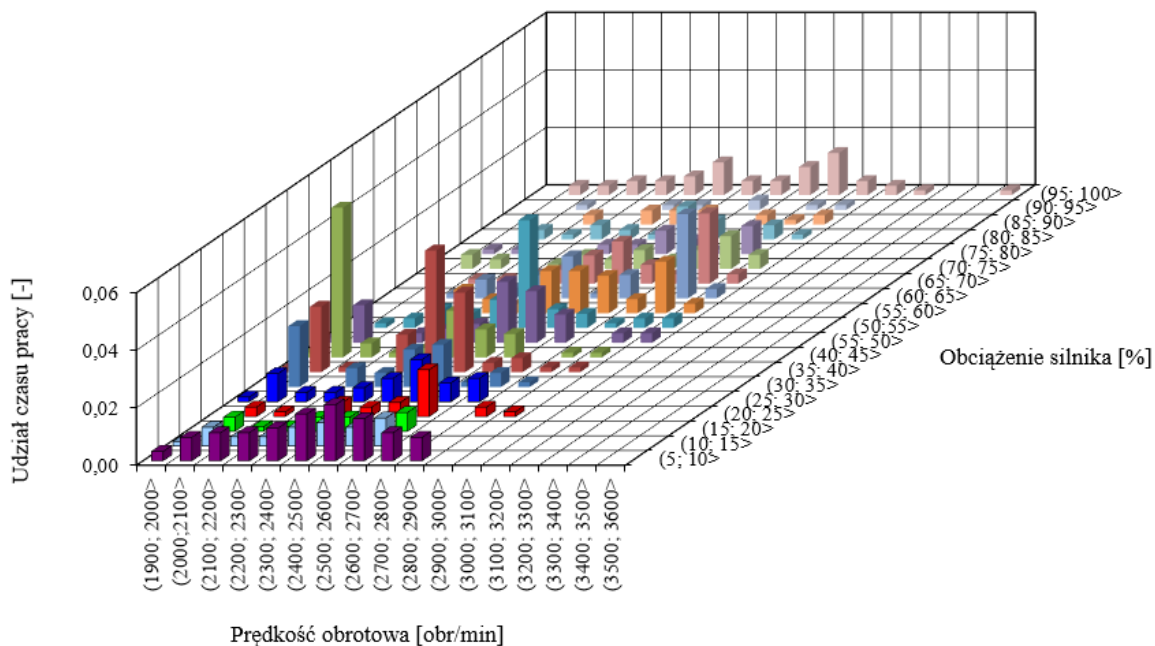


Rys. 7.16. Charakterystyka gęstości czasowej udziału pracy silnika w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika spalinowego podczas cyklu miejskiego



Rys. 7.17. Charakterystyka gęstości czasowej w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika spalinowego podczas cyklu pozamiejskiego

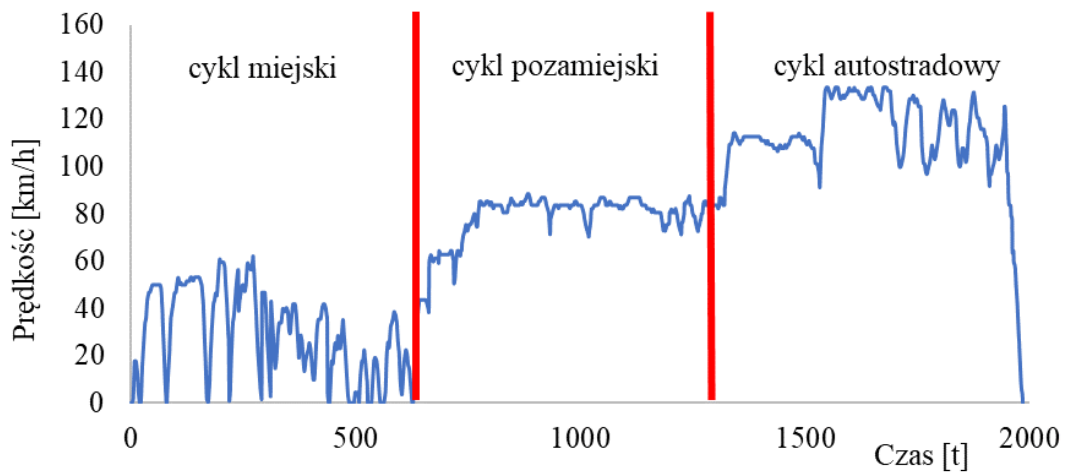
Cykl autostradowy charakteryzuje się parametrami pracy silnika w przedziałach największych obciążeń i prędkości obrotowych wału korbowego odpowiadających warunkom dopuszczalnych prędkości pojazdu wynikających z przepisów ruchu drogowego (rys. 7.18). W celu zwiększenia przejrzystości, na poniższych wykresach pokazano przedziały prędkości, w których zarejestrowano udział czasu pracy. Na rysunku 7.19 przedstawiono prędkość pojazdu w odwzorowanym teście. Na jej podstawie na etapie analizy wyników wyznaczono emisję drogową toksycznych i szkodliwych składników gazów wylotowych na hamowni silnikowej dla poszczególnych konfiguracji.



Rys. 7.18. Charakterystyka gęstości czasowej w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia silnika spalinowego podczas cyklu autostradowego

Tabela 7.9. Wybrane punkty pracy silnika na hamowni dynamicznej dla cyklu miejskiego, pozamiejskiego i autostradowego

	Zakresy prędkości obrotowej silnika [obr/min]	Zakresy obciążenia silnika [%]
Cykl miejski	Bieg jałowy	–
	1400–1500	5–10
	1400–1500	15–20
	1300–1400	25–30
	1300–1400	5–10
	1200–1300	5–10
Cykl pozamiejski	1600–1700	35–40
	1700–1800	35–40
	1700–1800	25–30
	1600–1700	30–35
	1600–1700	25–30
Cykl autostradowy	2000–2100	40–45
	2400–2500	35–40
	2500–2600	50–55
	2500–2600	35–40
	2900–3000	60–65



Rys. 7.19. Prędkość pojazdu w autorskim teście na hamowni silnikowej

Wybór metodyki badań wynika z konieczności opracowania rozwiązania stanowiącego połączenie zalet testów w warunkach ruchu drogowego i w laboratorium. Przeprowadzenie weryfikacji skuteczności konfiguracji badawczych w rzeczywistym pojeździe związane jest z koniecznością ingerencji w układ wylotowy. Dostosowanie oprogramowania sterowników silnika do komercyjnego układu oczyszczania gazów wylotowych wymaga nakładów finansowych przekraczających możliwości realizacji rozprawy doktorskiej. Aby uniknąć prezentowanych problemów przyjęto, że w ramach pracy zostanie opracowany autorski test badawczy, który będzie stanowił reprezentację warunków RDE na silnikowym stanowisku hamulcowym.

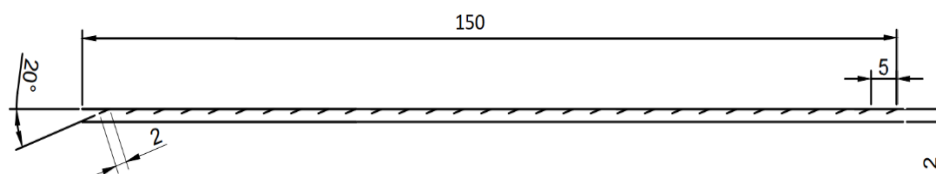
8. Opracowanie prototypów nośników metalowych filtrów cząstek stałych

8.1. Badania symulacyjne różnych wariantów filtracyjnych nośników metalowych

W rozdziale przedstawiono wyniki analizy numerycznej przepływu gazów wylotowych trzech wariantów metalowego nośnika filtra cząstek stałych. Podstawową różnicą w budowie wariantów modelu jest kąt nachylenia perforacji folii metalowej. Badania symulacyjne wykonano przy użyciu narzędzia *Fluent* stanowiącego element oprogramowania *Ansys Academic Research 2020 R2*. Wybór programu był podyktowany możliwością stworzenia modelu nośnika za pomocą dedykowanego narzędzia będącego częścią oprogramowania zapewniającego uniknięcie rozbieżności w geometrii modelu w wyniku importowania plików graficznych. Na rynku istnieje dedykowane oprogramowanie przeznaczone do obliczeń numerycznych elementów układu oczyszczania gazów wylotowych z rozbudowanymi możliwościami przedstawienia procesu filtracji, *AVL FIRE Aftertreatment*, jednak jest ono dedykowane do obliczeń filtrów wykonanych z nośników ceramicznych, znacząco różniących się danymi wejściowymi do modelu nośnika metalowego, w tym przede wszystkim geometrii kanałów nośnika. Brak jest możliwości zdefiniowania przekrojów charakterystycznych dla nośników metalowych co stanowi poważne ograniczenie w jego wykorzystaniu do realizacji celów dysertacji. To spowodowało konieczność wykorzystania narzędzia ukierunkowanego m. in. na geometrię modelu nośnika metalowego. Modele nośników charakteryzują się skomplikowanym kształtem i dużą liczbą kanałów, dlatego zastosowano moduł programu *Double Precision* (ang. podwójna precyzja) w celu zwiększenia dokładności przeprowadzonych obliczeń. Celem symulacji było przedstawienie wpływu różnic w geometrii poszczególnych modeli na rozkład prędkości i ciśnienia przepływu gazów wylotowych oraz skuteczność filtracji PM. Podczas analizy wyników symulacji rozważano wpływ prędkości przepływu, ciśnienia całkowitego, ciśnienia dynamicznego oraz stężenia PM w gazach wylotowych w funkcji prędkości oraz rozkładu tych wielkości na powierzchni nośnika. Wyniki zgrupowano z uwagi na wyżej wymienione parametry i porównano różnice w otrzymanych wartościach.

Analizowane warianty kształtu kanałów nośnika

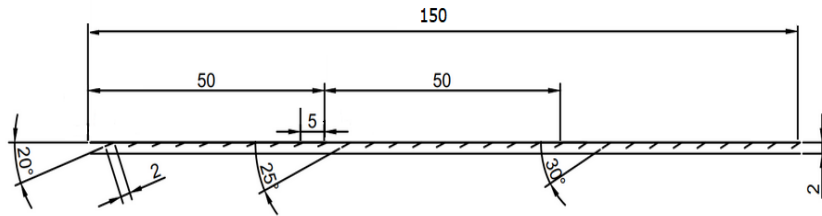
Analizie poddano trzy warianty nośników metalowych z różną perforacją folii metalowej tworzącej kanały filtracyjne. Pierwszym wariantem poddanym analizie jest nośnik o stałej geometrii perforacji na całej długości przekroju wzdłużnego kanału (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Wariant 1 – geometria kanału o stałym kącie nachylenia perforacji na całym przekroju wzdłużnym nośnika

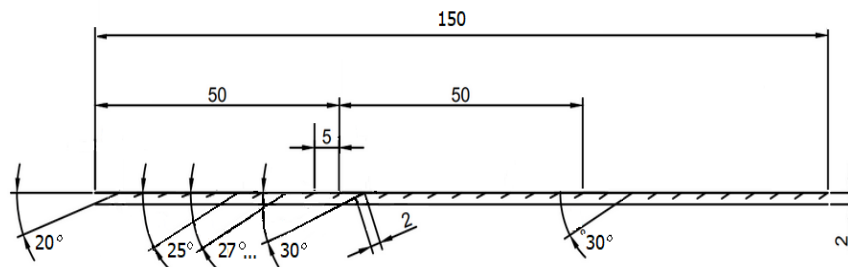
Ogólny model filtra składa się z 50 kanałów filtracyjnych o długości 150 mm i wysokości 2 mm (200 CPSI). Odległość pomiędzy perforacjami jest stała dla każdego

przypadku (5 mm). Drugi wariant geometrii modelu zakłada podział długości kanału nośnika na 3 odcinki (rys. 8.2). Każdy o długości 50 mm, ale zmiennym kącie nachylenia perforacji: 20°, 25°, 30°. Pozostałe parametry charakteryzujące odległość pomiędzy perforacjami oraz wysokości kanału są takie same jak w wariacie pierwszym.



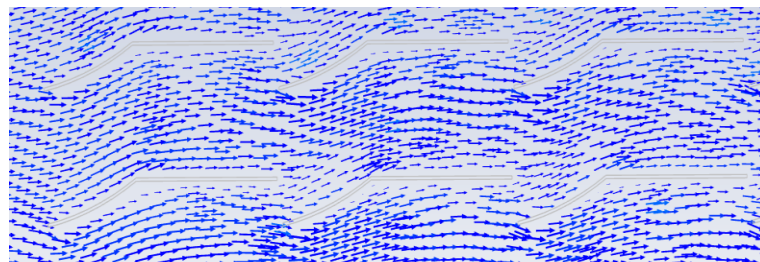
Rys. 8.2. Wariant 2 – geometria kanału podzielona na trzy odcinki o stałej długości i zmiennym kącie nachylenia perforacji: 20°, 25°, 30° na przekroju wzdłużnym nośnika, wysokości kanału są takie same jak w wariacie pierwszym

W trzecim wariacie zamodelowano podział kanału nośnika na trzy odcinki, również o stałej długości i zmiennym kącie perforacji, ale w tym przypadku kąty perforacji na pierwszym odcinku zmieniały się o 1°. Pozostałe odcinki charakteryzowały się kątem nachylenia perforacji 30° (rys. 8.3). Wariant porównawczy/odniesienia reprezentujący nośnik z przepływem typu *flow-through* składał się z 50 kanałów filtracyjnych o wysokości 2 mm (200 CPSI). Na powierzchni kanałów, zgodnie z pierwotnym założeniem technologii *flow-through*, nie zamodelowano perforacji. Wymiary zewnętrzne nośnika pozostały niezmiennie.



Rys. 8.3. Wariant 3 – geometria kanału podzielona na trzy odcinki o stałej długości i zmiennym kącie nachylenia perforacji, pierwszy odcinek to kąt nachylenia rosnący co 1° na każdym rzędzie perforacji (od 20° do 30°), pozostałe dwa odcinki to kąt nachylenia perforacji 30°

Zilustrowanie wektorów prędkości gazów wylotowych potwierdza skuteczność oddziaływania perforacji i wymuszenie kierunku przepływu gazów wylotowych na promieniach zewnętrznych osi wzdłużnej nośnika we wszystkich wariantach (rys. 8.4).



Rys. 8.4. Graficzne przedstawienie wektorów prędkości przepływu gazów pomiędzy ściankami kanałów filtracyjnych pokazujących kierunek przepływu

Zmiana wielkości wektorów ilustruje zmniejszenie prędkości przepływu gazów wylotowych w wyniku wymuszenia zmiany kierunku przepływu przez perforacje ścian kanałów

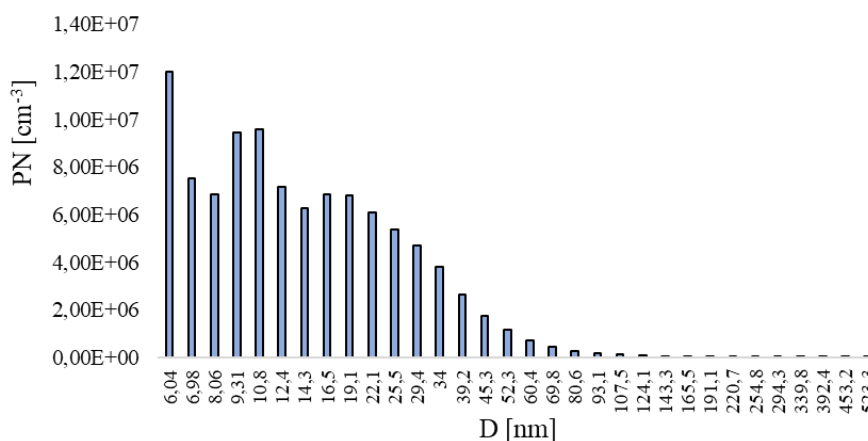
Parametry symulowanych gazów wylotowych

Do obliczeń numerycznych wykorzystano uprzednio zmierzony w warunkach rzeczywistych skład gazów wylotowych. Wartości zarejestrowano podczas badań RDE pojazdu z silnikiem SI DI. Poszczególne wartości uzyskano przez obliczenie masowego udziału składników w całkowitym strumieniu masy przepływających gazów wylotowych (tab. 8.1). Stężenie PM oraz gazowych składników gazów wylotowych wyliczono na podstawie pomiarów aparaturą typu PEMS.

Tabela 8.1. Procentowy skład gazów wylotowych zmierzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Składnik gazów wylotowych	Udział [%]
CO ₂	14,1
CO	0,9
NO _x	0,1
THC	0,1
O ₂	0,9
H ₂ O	12,9
N ₂	71
PM _m [mg/m ³]	114
PN [-]	1,29·10 ⁶

Program *Ansys Fluent* umożliwia odzwierciedlenie zjawiska przepływu PM za pomocą modelu fazy dyskretnej DPM (*Discrete Phase Model*). Z wartości przedstawionych za pomocą rozkładu wymiarowego PM obliczono ich udział masowy dla określonej średnicy (rys. 8.5). Dane dotyczące rozkładu wymiarowego wprowadzono do programu w postaci wartości reprezentujących udział masowy cząstek o danej średnicy w symulowanym przepływie (tab. 8.2).



Rys. 8.5. Rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych wykorzystany do badań

Tabela 8.2. Parametry modelu DPM odpowiedzialne za odzwierciedlenie przepływu PM

Lp.	Oznaczenie	Średnica [nm]	Liczba	Udział [%]	Masa [kg/s]
1	inj_1	6,04	$1,20 \cdot 10^7$	11,983	$1,55 \cdot 10^7$
2	inj_2	6,98	$7,53 \cdot 10^6$	7,521	$9,72 \cdot 10^8$
3	inj_3	8,06	$6,84 \cdot 10^6$	6,830	$8,83 \cdot 10^8$
4	inj_4	9,31	$9,44 \cdot 10^6$	9,428	$1,22 \cdot 10^7$
5	inj_5	10,8	$9,60 \cdot 10^6$	9,588	$1,24 \cdot 10^7$
6	inj_6	12,4	$7,17 \cdot 10^6$	7,165	$9,26 \cdot 10^8$
7	inj_7	14,3	$6,27 \cdot 10^6$	6,265	$8,10 \cdot 10^8$
8	inj_8	16,5	$6,85 \cdot 10^6$	6,847	$8,85 \cdot 10^8$
9	inj_9	19,1	$6,80 \cdot 10^6$	6,789	$8,78 \cdot 10^8$
10	inj_10	22,1	$6,09 \cdot 10^6$	6,082	$7,86 \cdot 10^8$
11	inj_11	25,5	$5,39 \cdot 10^6$	5,385	$6,96 \cdot 10^8$
12	inj_12	29,4	$4,71 \cdot 10^6$	4,706	$6,08 \cdot 10^8$
13	inj_13	34	$3,80 \cdot 10^6$	3,793	$4,90 \cdot 10^8$
14	inj_14	39,2	$2,64 \cdot 10^6$	2,642	$3,42 \cdot 10^8$
15	inj_15	45,3	$1,77 \cdot 10^6$	1,767	$2,28 \cdot 10^8$
16	inj_16	52,3	$1,17 \cdot 10^6$	1,166	$1,51 \cdot 10^8$
17	inj_17	60,4	$7,31 \cdot 10^5$	0,730	$9,44 \cdot 10^9$
18	inj_18	69,8	$4,59 \cdot 10^5$	0,458	$5,92 \cdot 10^9$
19	inj_19	80,6	$2,82 \cdot 10^5$	0,281	$3,64 \cdot 10^9$
20	inj_20	93,1	$1,91 \cdot 10^5$	0,191	$2,47 \cdot 10^9$
21	inj_21	107,5	$1,33 \cdot 10^5$	0,133	$1,72 \cdot 10^9$
22	inj_22	124,1	$9,64 \cdot 10^4$	0,096	$1,24 \cdot 10^9$
23	inj_23	143,3	$6,70 \cdot 10^4$	0,067	$8,66 \cdot 10^{10}$
24	inj_24	165,5	$4,44 \cdot 10^4$	0,044	$5,74 \cdot 10^{10}$
25	inj_25	392,4	$2,74 \cdot 10^4$	0,027	$3,54 \cdot 10^{10}$
26	inj_26	523,3	$1,46 \cdot 10^4$	0,015	$1,89 \cdot 10^{10}$
			Suma	100	$1,29 \cdot 10^6$

Prędkość przepływu gazów wylotowych uzyskano przez podział całkowitego strumienia gazów wylotowych przez pole przekroju kanału dolotowego (tab. 8.3). Najważniejszymi parametrami określającymi warunki brzegowe do obliczeń są temperatura, prędkość i ciśnienie gazów wylotowych na wlocie nośnika.

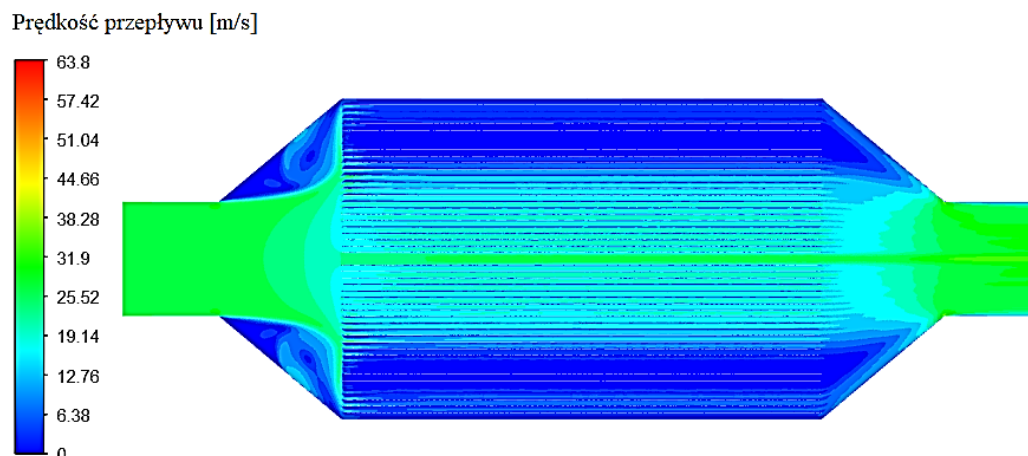
Tab. 8.3. Podstawowe parametry gazów wylotowych

Parametr gazów wylotowych	Jednostka	Wartość
Temperatura	[°C]	368,93
Prędkość początkowa	[m/s]	27,64
Ciśnienie	[Pa]	100000

Wyniki symulacji

Rozkład prędkości przepływu gazów wylotowych

Filtry z przepływem typu *flow-through* cechują się ukierunkowaniem strumienia gazów na centralną część nośnika. Głównym zadaniem zaprojektowanej geometrii kanałów w każdym z przypadków było rozproszanie strumienia gazów wylotowych w kierunku zewnętrznych promieni osi wzdłużnej. W celu wykazania wpływu zastosowania perforacji folii metalowej wykonano symulację przepływu przez nośnik bez perforacji ścian kanałów (rys. 8.6).

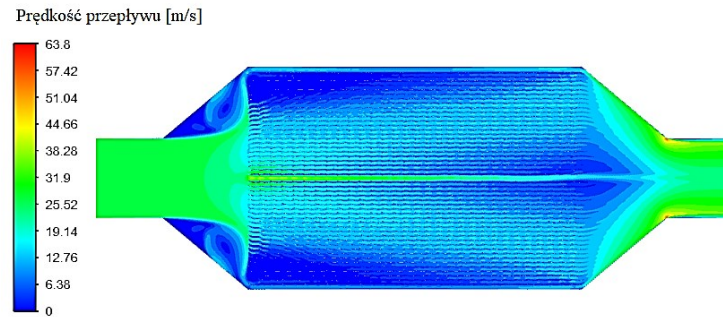


Rys. 8.6. Rozkład prędkości przepływu przez symulowany nośnik typu *flow-through* z kanałami o wysokości 2 mm bez perforacji

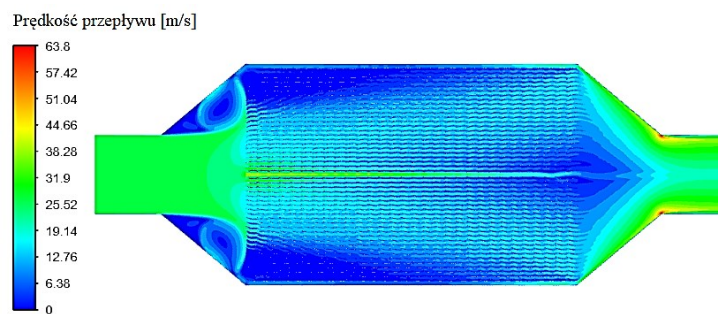
Prędkość początkowa gazów wylotowych 27,64 m/s uległa zmniejszeniu o połowę podczas wlotu do nośnika. Na zewnętrznych średnicach nośnika stwierdzono trzykrotne zmniejszenie prędkości. Zastosowanie perforacji kanałów spowodowało wymuszenie przepływu gazów w kierunku zewnętrznych średnic wlotu do nośnika filtra we wszystkich wariantach, co świadczy o pozytywnym aspekcie zastosowania perforacji na rozkład prędkości gazów wylotowych. Perforacje o stałym kącie nachylenia na powierzchni nośnika (wariant 1) doprowadziły do rozproszania gazów wylotowych w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu gazów zmniejszając intensywność

przepływu w centralnym obszarze nośnika (rys. 8.7a). Prędkość przepływu przez wariant 2 nośnika wskazuje na zniwelowanie problemu pojawienia się turbulencji przy jednocześnie najbardziej równomiernym rozkładzie prędkości przepływu na całym przekroju poprzecznym nośnika filtra (rys. 8.7b). Stopniowy wzrost kąta nachylenia perforacji (wariant 3) skutkowało zmniejszeniem wzdłużnego przekroju przelotowego kanału na całej długości i zmniejszeniem prędkości przepływu gazów względem wariantów 1 i 2. Pomimo tego równomierny rozkład prędkości przepływu na przekroju poprzecznym nośnika w największym stopniu uzyskano dla wariantu 3 (rys. 8.7c).

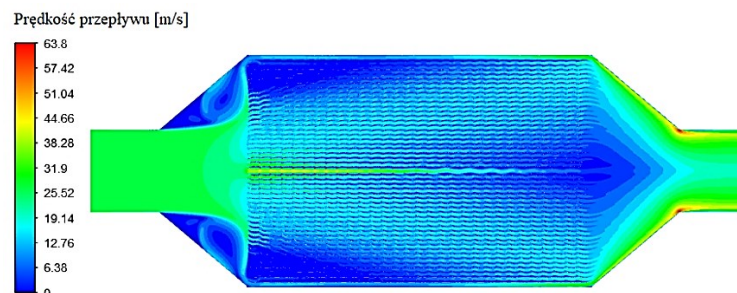
a)



b)



c)



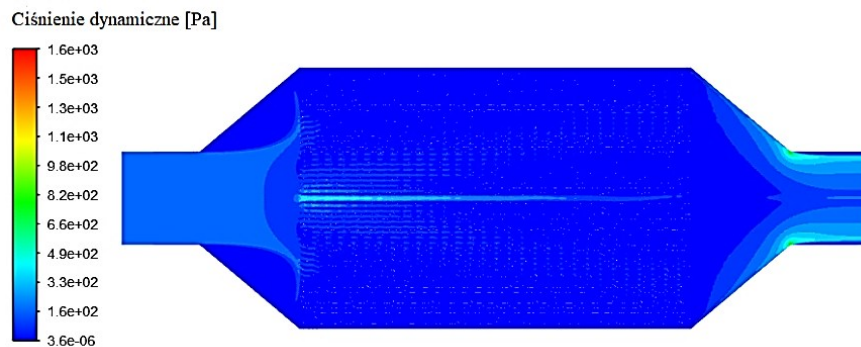
Rys. 8.7. Rozkład prędkości przepływu gazów wylotowych: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3

Rozkład ciśnienia dynamicznego gazów wylotowych

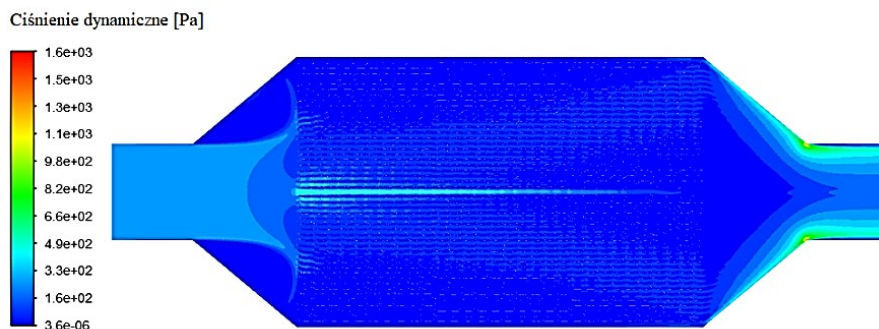
Podczas przepływu gazów wylotowych przez nośnik następuje zwiększenie wartości wektora siły oporu w kierunku przeciwnym do przepływu na skutek działania energii kinetycznej. W przypadku oddziaływania gazów na powierzchnię wewnętrzną filtra powstaje ciśnienie dynamiczne. Stanowi ono sumę oporów hydraulicznych uwzględniających m.in. chropowatość ścianek i zgromadzone PM. Rozkład ciśnienia dynamicznego pokrywa

się z kierunkiem profilu prędkości przepływu i wskazuje obszary o największym stopniu rozproszania strumienia gazów wylotowych. We wszystkich wariantach zaobserwowano zwiększenie ciśnienia dynamicznego w obszarze wylotu z filtra (rys. 8.8). Zmniejszenie przepustowości kanału filtracyjnego wywołane zwiększeniem kąta perforacji powoduje powstanie większych wartości ciśnienia dynamicznego w układzie. Najmniejszymi wartościami cechuje się wariant 1 zakładający stały kąt nachylenia na całym przekroju wzdłużnym nośnika (rys. 8.8a). W przypadku wariantu pierwszego i drugiego zauważono tendencję do powstawania ciśnienia wstecznego powodującego opory przepływu przez nośnik/filtr cząstek stałych. Zjawisko to powiązane jest z prędkością przepływu gazów, która osiąga najmniejsze wartości dla wariantu 1 i 2. Wariant 2 charakteryzuje się pośrednimi wartościami prędkości przepływu gazów wylotowych i różnicy ciśnienia początkowego i końcowego względem wariantów 1 i 3 (rys. 8.8b). Największe wartości ciśnienia dynamicznego zaobserwowano dla wariantu 3 (rys. 8.8c), przy jednoczesnym zawirowaniu strumienia gazów w obszarze osi wzdłużnej filtra.

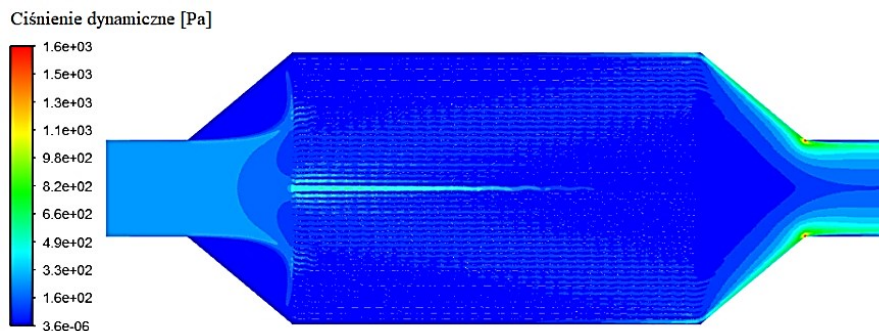
a)



b)



c)

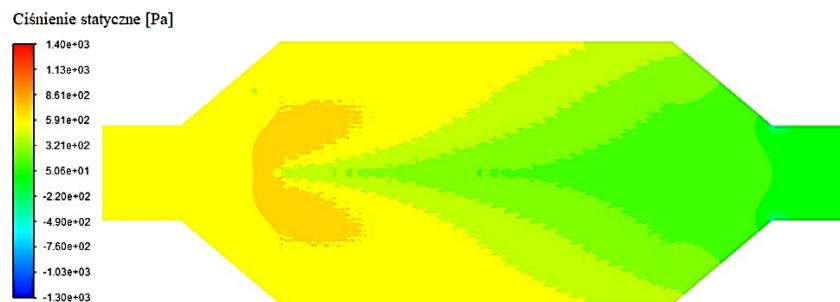


Rys. 8.8. Rozkład ciśnienia dynamicznego gazów wylotowych: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3

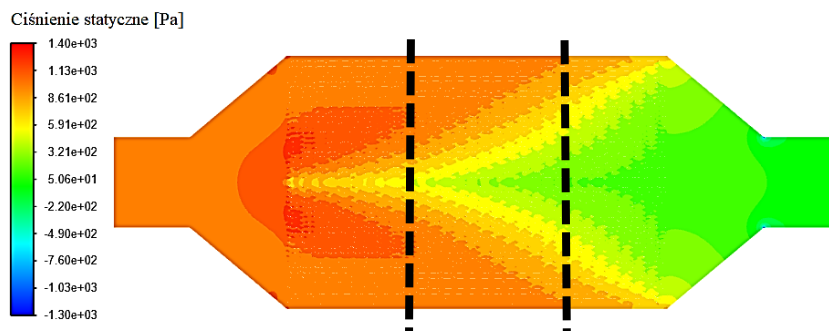
Rozkład ciśnienia statycznego gazów wylotowych

Jednym z głównych parametrów termodynamicznych gazów jest ciśnienie statyczne. Przejawia się ono w postaci ciśnienia na ściankach filtra. W odróżnieniu od ciśnienia dynamicznego nie mają na nie wpływu parametry przepływu gazów wylotowych. W wyniku wychwytywania cząstek stałych następuje zmniejszenie przepływu gazu, co powoduje wzrost ciśnienia statycznego. Dla wariantu 1 wartości ciśnienia statycznego była ponad dwukrotnie mniejsza niż w wariacie 3. Świadczy to o mniejszych oporach przepływu przez kanał o stałej wysokości perforacji (brak zmiany kąta nachylenia perforacji wzdłuż osi wzdłużnej całego nośnika) (rys. 8.9a). W wariacie 2 rozkład ciśnienia statycznego w ostatnim odcinku nośnika jest równomierny (rys. 8.9b). Największą różnicę pomiędzy ciśnieniem statycznym początkowym i końcowym zauważono dla wariantu 3 (rys. 8.9c). Zmienna geometria perforacji na pierwszym odcinku filtra powoduje ustalenie rozkładu ciśnienia statycznego od rozpoczęcia drugiego odcinka nośnika. Wykazuje to brak wpływu perforacji o stałym kącie nachylenia w drugim odcinku nośnika na przebieg rozkładu ciśnienia statycznego.

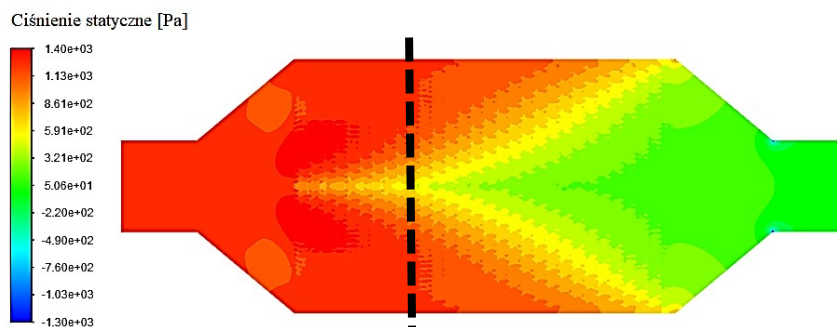
a)



b)



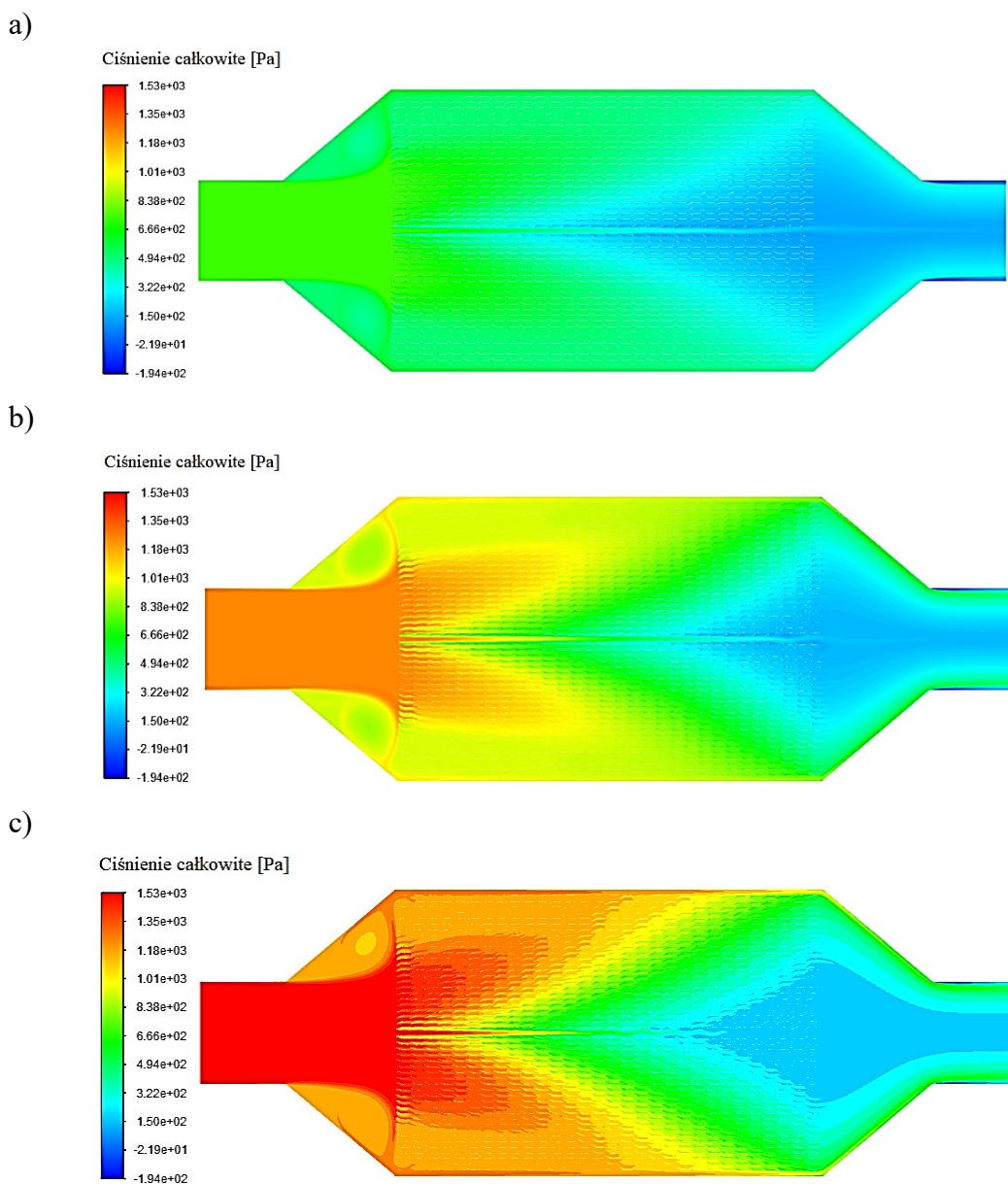
c)



Rys. 8.9. Rozkład ciśnienia statycznego gazów wylotowych: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, linia przerywana oznacza zmianę wartości kąta nachylenia perforacji i wyznacza odcinki nośnika

Ciśnienie całkowite

Ciśnienie całkowite uzyskiwane jest przez zamianę energii kinetycznej gazu na energię wynikającą z ciśnienia przepływającego czynnika. Stanowi sumę ciśnienia statycznego i dynamicznego [78]. Stały kąt nachylenia perforacji wzdłuż osi wzdłużnej kanałów w wariant 1 skutkuje najmniejszym przyrostem ciśnienia całkowitego w całej objętości nośnika (rys. 8.10a). W wariant 2 zaobserwowano wyraźny wpływ zmian wartości kąta nachylenia perforacji w postaci powstania obszarów o zmiennym ciśnieniu całkowitym na kolejnych odcinkach nośnika (rys. 8.10b). Przyrost kąta nachylenia perforacji o 1° w pierwszym odcinku nośnika wariantu 3 spowodował gwałtowny przyrost ciśnienia całkowitego wzdłuż przekroju poprzecznego wlotu filtra (rys. 8.10c). Może to skutkować powstaniem zjawiska ciśnienia wstecznego w wyniku zwiększonych oporów przepływu gazów wylotowych na wlocie skutkującym znaczącym spadkiem ciśnienia całkowitego na końcu nośnika filtra.

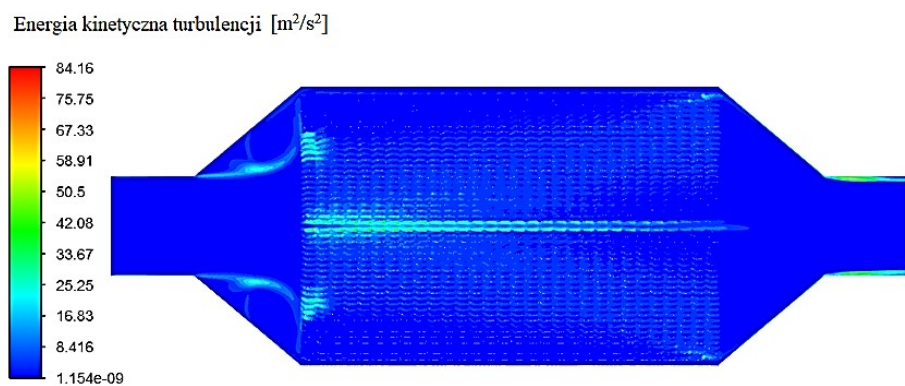


Rys. 8.10. Rozkład ciśnienia całkowitego gazów wylotowych: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3

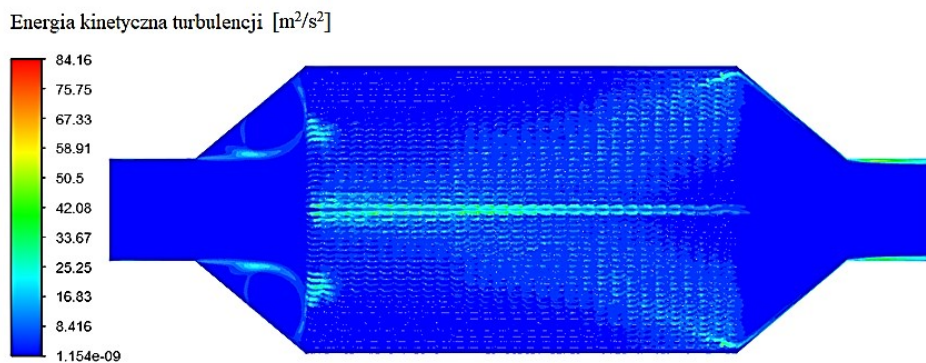
Rozkład energii kinetycznej turbulencji

Ruch przepływającego czynnika powoduje powstanie turbulentnej energii kinetycznej. Średnia energia kinetyczna przekształcona zostaje w turbulencje, które jednocześnie powodują efekt przeciwdziałania siłom tarcia powstałym na powierzchni styku przepływającego gazu i nośnika. Wartość energii kinetycznej turbulencji w wariancie 3 wskazuje na jej duże wartości na powierzchni filtra, na której nie zamodelowano perforacji (rys. 8.11c). Warianty 1 i 2, w stosunku do 3, cechują się mniejszą intensywnością turbulencji przy zewnętrznej krawędzi odpowiadającej maksymalnej średnicy przekroju nośnika. Wskazuje to na możliwość bardziej efektywnego wykorzystania przestrzeni kanałów filtracyjnych (rys. 8.11a–b). Wariant 2 stanowi połączenie równomiernego rozkładu prędkości przepływu (rys. 8.7) i ograniczonego zjawiska turbulencji przy osi wzdłużnej nośnika (rys. 8.11b).

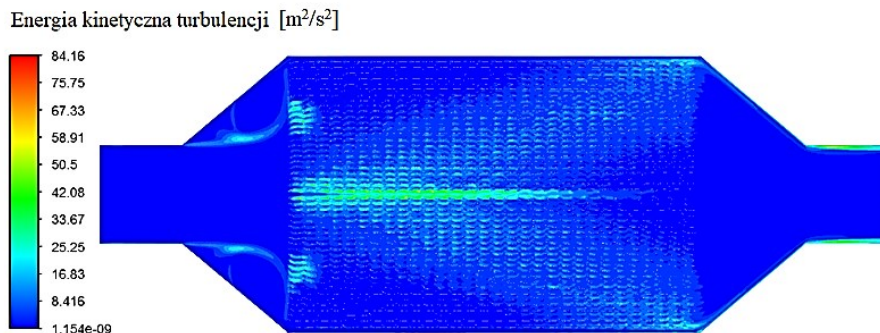
a)



b)



c)

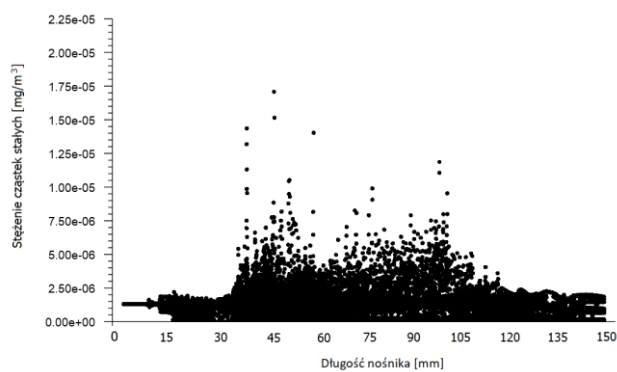


Rys. 8.11. Rozkład energii kinetycznej turbulencji gazów wylotowych: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3

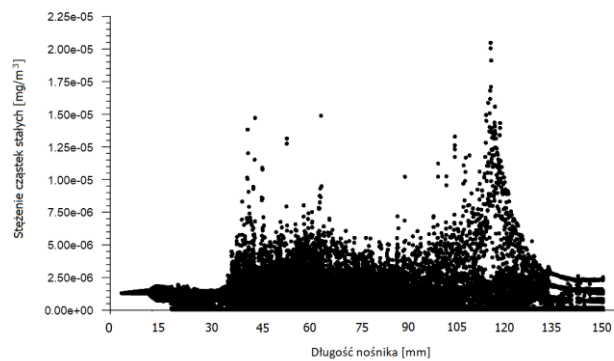
Stężenie cząstek stałych na powierzchni filtra

Jednym z najważniejszych etapów projektowania nośników filtrów cząstek stałych jest odpowiednie umiejscowienie obszarów mających wpływ na przebieg reakcji utleniania. Za pomocą obliczeń numerycznych określono tendencję do gromadzenia PM na danym odcinku nośnika (rys. 8.12). Warianty 1 i 2 charakteryzują się największym stężeniem PM na ostatnim odcinku filtra (rys. 8.12a–b). Założenie konstrukcyjne wskazuje na zasadność umiejscowienia części utleniającej w końcowym odcinku nośnika. W wariantcie 3 stężenie cząstek stałych rozkłada się równomiernie na całej długości filtra, co wskazuje na konieczność umieszczenia warstwy katalitycznej we wszystkich odcinkach nośnika. Z punktu widzenia producenta jest to najmniej korzystne rozwiązanie, ponieważ związane jest ze zwiększeniem kosztów produkcji z uwagi na cenę pierwiastków PGM (rys. 8.12c).

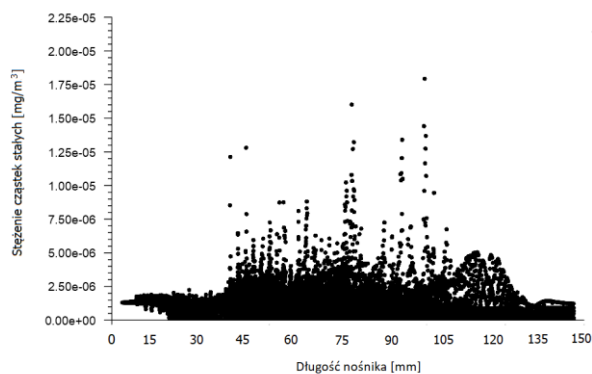
a)



b)



c)



Rys. 8.12. Stężenie cząstek stałych w zależności od długości nośnika:
a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3

Podsumowanie

Za pomocą obliczeń numerycznych wykazano zasadność zastosowania perforacji ścian kanałów nośnika filtra cząstek stałych. Modyfikacje geometrii modelowanych wariantów nośnika skutkują zwiększeniem sprawności filtracji do poziomu 90% (tab. 8.4). Sprawność uzyskana w wyniku symulacji odzwierciedla stężenie cząstek o określonym procentowym udziale masy względem poszczególnych średnic na podstawie rozkładu wymiarowego. W rzeczywistości PM ulegają utlenianiu i akumulacji w sposób ciągły, więc wiarygodną wartość uzyskać można jedynie w sposób empiryczny. Obliczenia numeryczne stanowią składową procesy projektowania, którego weryfikacja odbywa się w warunkach rzeczywistych.

Tabela 8.4. Skuteczność filtracji poszczególnych geometrii kształtu kanałów nośników

	Liczba cząstek		
	zmierzonych	wychwyconych	[%]
Wariant 1	3094	2667	86
Wariant 2	3094	2763	89
Wariant 3	3094	2815	91
Wariant porównawczy <i>flow-through</i>	3094	427	14

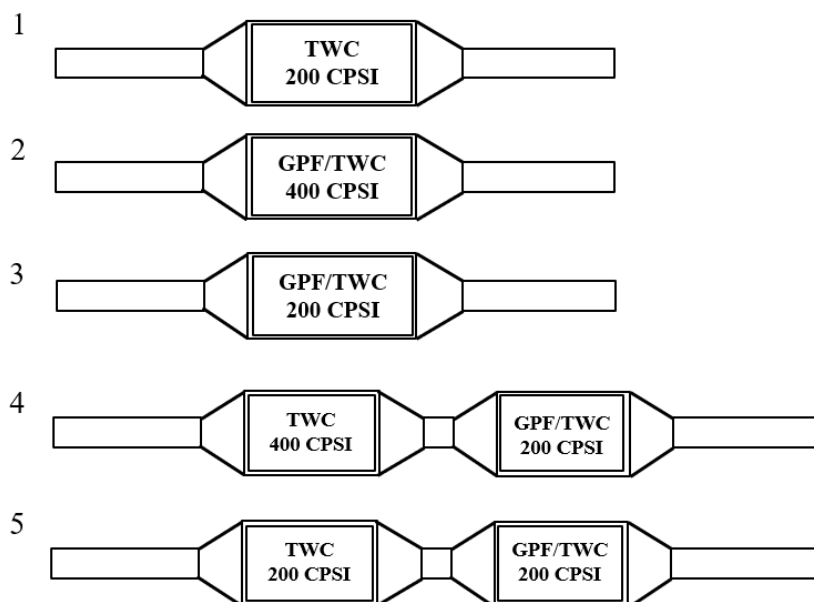
8.2. Zaprojektowanie wariantów nośników metalowych w oparciu o badania symulacyjne

Projektowanie filtra cząstek stałych obejmowało określenie parametrów technicznych zarówno nośnika, jak i obudowy filtra. Pierwszym etapem projektowania był wybór konfiguracji elementów układu oczyszczania gazów wylotowych. Nowoczesne pojazdy z silnikami SI DI spełniające normę Euro 6d wyposażone są w układy oczyszczania gazów wylotowych o następującym rozmieszczeniu elementów [66]:

- układ zintegrowany TWC+GPF, w którym filtracja odbywa się, oprócz wykorzystania technologii *wall-flow*, przez pokryty katalitycznie nośnik filtra cząstek stałych,
- dwa nośniki w jednej obudowie w kolejności TWC+GPF/TWC,
- dwa nośniki w osobnych obudowach w kolejności TWC+GPF/TWC,
- dwa osobne nośniki w osobnych obudowach w kolejności: TWC+GPF bez warstwy katalitycznej.

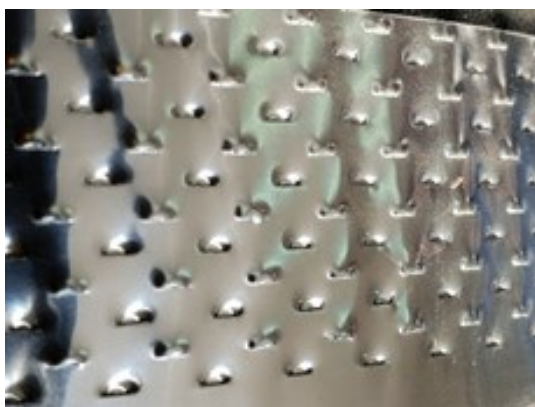
Badaniom poddano 5 konfiguracji układów wylotowych (rys. 8.13). Konfiguracje 1 i 2 stanowiły rozwiązania OEM, natomiast 3–5 zaprojektowano na podstawie wyników badań symulacyjnych. Filtrem wykorzystanym w konfiguracjach 3–5 był GPF wytworzony na podstawie wariantu 2 modelu symulacyjnego. Pomimo tego, że nie był to wariant o największej sprawności filtracji (89%), wpływ na decyzję miały także pozostałe parametry charakteryzujące symulowane nośniki, takie jak równomierny rozkład prędkości przepływu gazów wylotowych, bardziej efektywne wykorzystanie przestrzeni kanałów filtracyjnych oraz wpływ stopniowej zmiany kąta nachylenia perforacji dla każdej z 3 części nośnika. Stały kąt nachylenia perforacji w wariantach 1

nie spełnia wymagań zakładających rozproszanie gazów wylotowych w wystarczającym stopniu. Najmniejsza wartość energii kinetycznej turbulencji w wariantcie 1 skutkuje niedostatecznym zawirowaniem gazów wylotowych, w tym PM, co zmniejsza prawdopodobieństwo zderzenia się PM ze ściankami nośnika filtra, a tym samym zainicjowaniu reakcji utleniania. Odrzucenie wariantu 3 podyktowano największymi wartościami ciśnienia całkowitego, statycznego i dynamicznego w filtrze, co skutkuje zwiększeniem ciśnienia wstecznego (oporów przepływu).



Rys. 8.13. Schematy konfiguracji badawczych układów oczyszczania gazów wylotowych

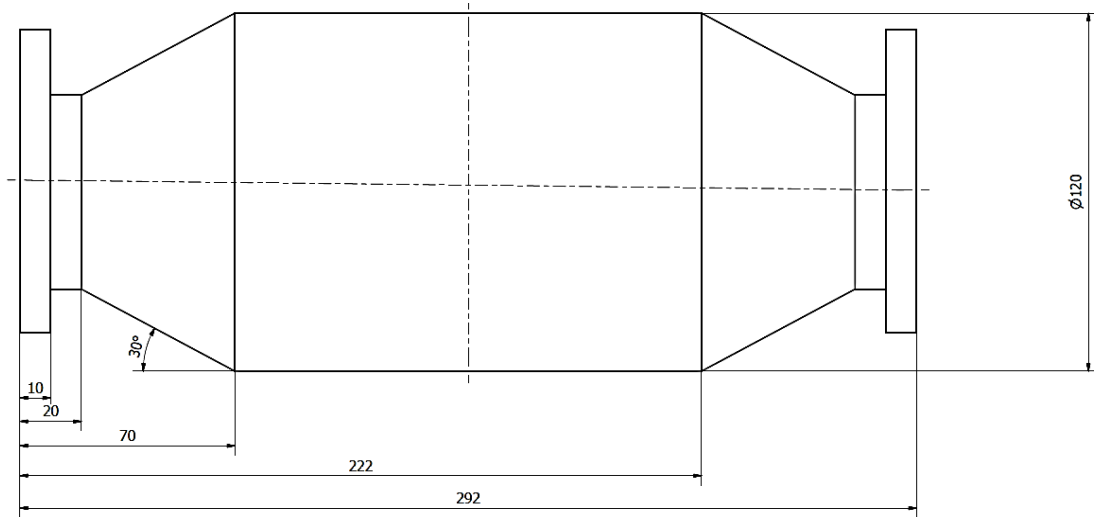
Reaktory TWC wykorzystane do badań wykonano na potrzeby realizacji projektu badawczego prowadzonego we współpracy z producentem reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek AWG Polonez. Filtry wykonano za pomocą technologii rolowania blachy metalowej z perforacjami wykonanymi zgodnie z założeniami wynikającymi z przeprowadzonych obliczeń numerycznych (rys. 8.14).



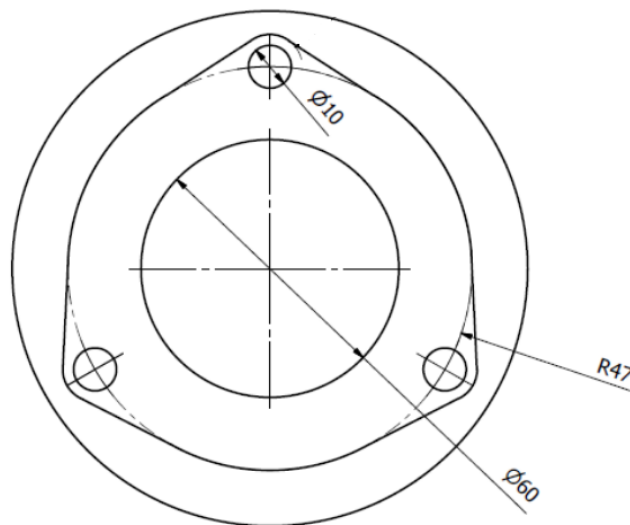
Rys. 8.14. Perforowana blacha metalowa wykorzystywana do wytwarzania nośników filtrów cząstek stałych

Kąty nachylenia perforacji zaprojektowano zgodnie z założeniem wariantu 2 symulacji. Nośnik podzielono na 3 odcinki, w których każdy charakteryzował się stałymi perforacjami o kącie nachylenia odpowiednio 20°, 25° i 30°. Przyjęto średnicę

nośnika 100 mm i długość 150 mm. Są to wymiary zbliżone do rozwiązań stosowanych seryjnie dla badanych silników przez producentów reaktorów katalitycznych i filtrów cząstek stałych w zdecydowanej większości rozwiązań. Wymiary obudowy i króćca montażowego przedstawiono na rysunkach 8.15 i 8.16. Kąt nachylenia dyfuzora i konfuzora (30°) dostosowano do średnicy rury układu wylotowego.



Rys. 8.15. Wymiary przekroju wzdłużnego obudowy zaprojektowanego nośnika



Rys. 8.16. Widok króćca montażowego obudowy nośnika

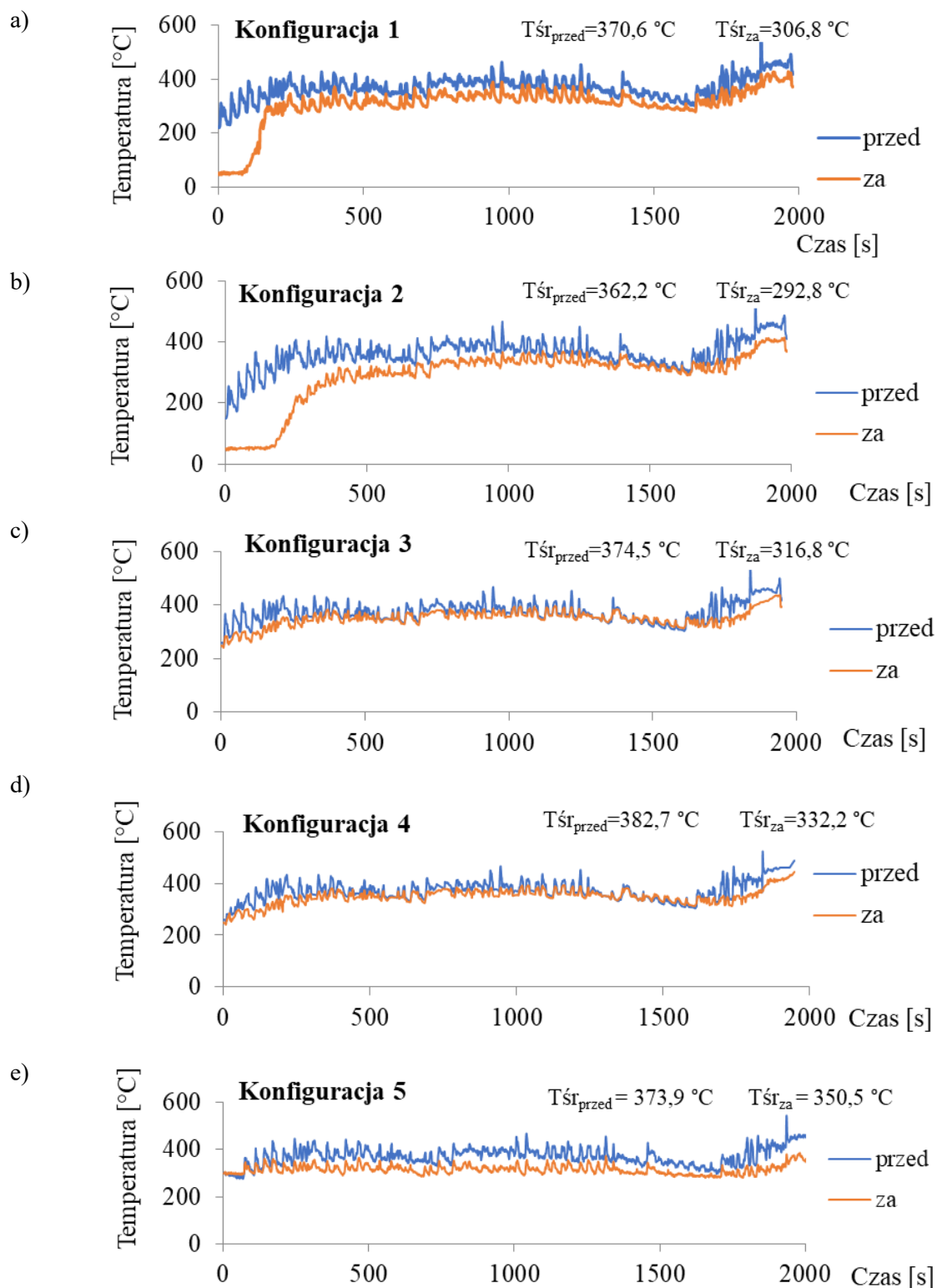
9. Badania porównawcze i weryfikacyjne

9.1. Badania na hamowni dynamicznej w odwzorowanym teście rzeczywistym

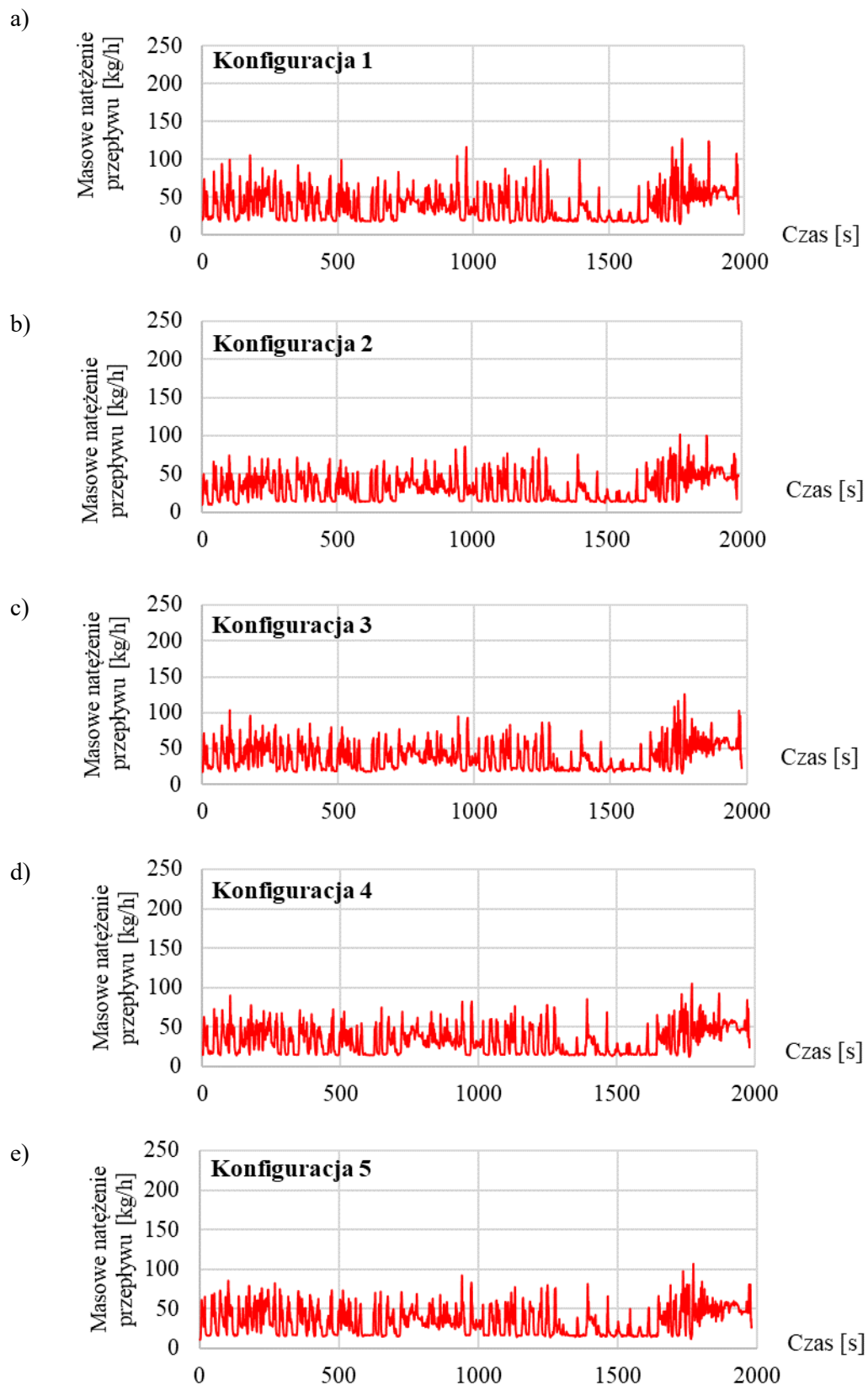
9.1.1. Badania parametrów termodynamicznych

Na podstawie punktów pomiarowych przed i za elementami badanych konfiguracji określono różnice temperatury dla każdej z nich (rys. 9.1). Pomiary dla każdej z konfiguracji zaczynały się od momentu uzyskania takiej samej temperatury gazów wylotowych (mierzonej przed układami oczyszczania) oraz badanych układów katalitycznych w celu porównania. Wyniki uzyskane dla konfiguracji 1 i 2 z nośnikiem ceramicznym wskazują na opóźnienie osiągnięcia temperatury *light-off* (około 250–300°C) o 150 s w przypadku komercyjnego TWC (rys. 9.1a) i 300 s dla komercyjnego GPF/TWC (rys. 9.1b). Zastosowanie ceramiki jako materiału nośnika jest równoznaczne z długim nagrzewaniem i różnicą pomiędzy temperaturą przed i za reaktorem/filtrem wynoszącą około 200°C w początkowej fazie cyklu. W przypadku pozostałych konfiguracji (z nośnikiem metalowym) różnica wynosiła maksymalnie 90°C w cyklu autostradowym. Sprawność konwersji w reaktorze katalitycznym jest ściśle zależna od temperatury, dlatego zastosowanie nośnika metalowego skutkowało znaczącym ograniczeniem emisji dla konfiguracji 4 i 5. Konfiguracja 3 składała się z jednego filtra GPF/TWC wykonanego z folii metalowej, co spowodowało umiarkowaną rozbieżność temperatury przed i za filtrem podczas całego testu (rys. 9.1c). Świadczy to o równomiernym nagrzewaniu się nośnika na całej powierzchni i małych stratach ciepła w wyniku przepływu przez kolejne elementy układu, jak również potwierdza wadę nośników metalowych, które szybko się nagrzewają, ale również szybko się chłodzą. Rozbieżność temperatury w końcowej części testu jest zjawiskiem charakterystycznym dla wszystkich konfiguracji i wynika ze wzrostu obciążenia w warunkach autostradowych. Zastosowanie dwóch elementów (TWC+GPF/TWC) w układzie wylotowym spowodowało zwiększenie temperatury przed reaktorem o średnio 50°C, w porównaniu do konfiguracji z TWC/GPF, co mogło wynikać z większego oporu przepływu gazów wylotowych. Wynikiem tego jest zmniejszona różnica temperatury przed i za TWC+GPF/TWC (rys. 9.1d, 9.1e). Zbliżony rozkład temperatury na całej powierzchni elementów (TWC+GPF/TWC) od początku testu jest potwierdzeniem zwiększonej skuteczności układu, począwszy od ustabilizowanej temperatury układu wylotowego na obrotach biegu jałowego, aż do końca cyklu autostradowego i świadczy o małej bezwładności cieplnej.

Masowe natężenie przepływu było zbliżone dla wszystkich konfiguracji i wynikało z powtarzalności zadanych warunków pracy podczas trwania testu badawczego (rys. 9.2). Różnica pomiędzy temperaturą przed i za badanymi konfiguracjami w początkowej fazie testu ma wpływ na wartości masowego natężenia przepływu gazów wylotowych w przedziale 80 kg/h. Zastosowanie komercyjnego GPF/TWC skutkowało ograniczeniem zakresu do 60 kg/h na początku testu (rys. 9.2b). Największym przedziałem zarejestrowanych wartości natężenia przepływu charakteryzuje się konfiguracja 3 (rys. 9.2c). Najistotniejszy wpływ na stabilizację masowego natężenia przepływu miało zastosowanie konfiguracji 4 i 5 z dwoma elementami w układzie wylotowym. Przebiegi masowego natężenia przepływu dla konfiguracji 4 i 5 (rys. 9.2e) są zbliżone. Nieznaczne zwiększenie wartości natężenia przepływu zarejestrowano dla konfiguracji 4 (rys. 9.2d).



Rys. 9.1. Porównanie temperatury przed i za reaktorem/filtrem dla badanych konfiguracji: a) 1 (komercyjny TWC), b) 2 (komercyjny GPF/TWC), c) 3 (prototypowy GPF/TWC), d) 4 (TWC 400 CPSI + prototypowy GPF/TWC), e) 5 (TWC 200 CPSI + prototypowy GPF/TWC)

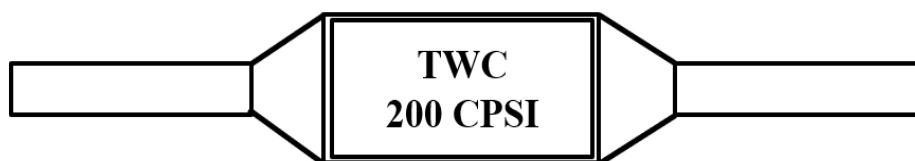


Rys. 9.2. Masowe natężenie przepływu gazów wylotowych dla badanych konfiguracji: a) 1 (komercyjny TWC), b) 2 (komercyjny GPF/TWC), c) 3 (prototypowy GPF/TWC), d) 4 (TWC 400 CPSI + prototypowy GPF/TWC), e) 5 (TWC 200 CPSI + prototypowy GPF/TWC)

9.1.2. Badania emisji z użyciem komercyjnych nośników ceramicznych

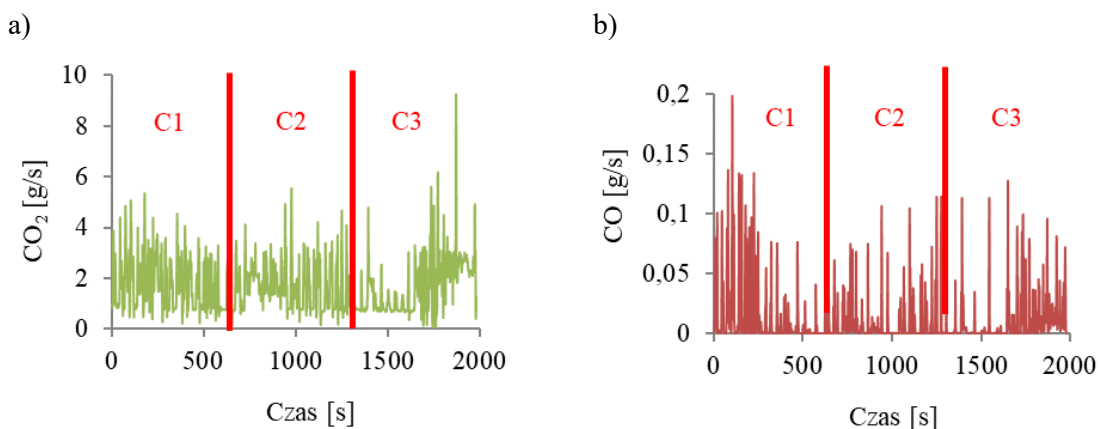
Konfiguracja 1

Pierwszą badaną konfiguracją był komercyjny reaktor katalityczny TWC z nośnikiem ceramicznym produkowany seryjnie i stosowany w nowych pojazdach (rys. 9.3). Badania z wykorzystaniem nośników komercyjnych wykonano w celu porównania sprawności filtracji i skuteczności działania w zakresie ograniczania toksycznych i szkodliwych składników gazów wylotowych z konfiguracjami prototypowymi.



9.3. Schemat układu badawczego z komercyjnym nośnikiem ceramicznym

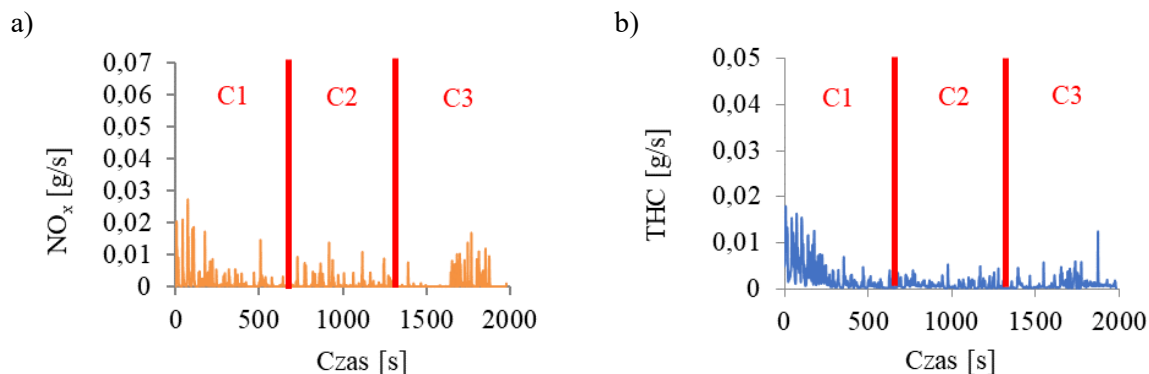
Największymi wartościami natężenia emisji CO₂ charakteryzuje się końcowy etap testu odwziewający warunki poruszania się w cyklu autostradowym. W cyklu miejskim i pozamiejskim nie zaobserwowano dużych różnic wartości, poza początkowym etapem cyklu pozamiejskiego. Większe obciążenie silnika wymagane do osiągnięcia prędkości 90–140 km/h spowodowało zwiększenie zużycia paliwa, a tym samym emisji CO₂ (rys. 9.4a). Zjawisko niecałkowitego i niepełnego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w początkowej fazie testu może wynikać z niedostatecznej temperatury utleniania i skutkuje zwiększoną emisją CO (rys. 9.4b). Wraz ze wzrostem temperatury układu emisja CO maleje w drugiej części testu i ulega ponownemu zwiększeniu w warunkach autostradowych.



Rys. 9.4. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 1 układu wylotowego: a) CO₂, b) CO; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

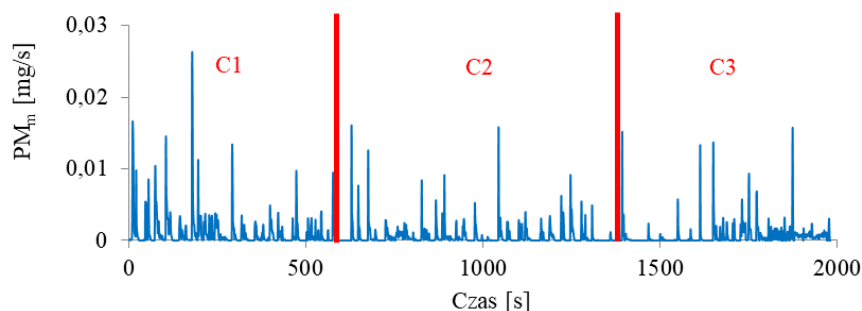
Sprawność procesów redukcji i utleniania przez reaktor katalityczny w początkowej fazie testu jest najmniejsza, ponieważ nośnik nie osiągnął temperatury niezbędnej do zainicjowania wystarczającej liczby reakcji. Skutkiem tego jest zwiększona emisja NO_x w warunkach cyklu miejskiego (rys. 9.5a). Wartości emisji w końcowej fazie testu

odpowiadają warunkom panującym w komorze spalania podczas pracy silnika z dużym obciążeniem w cyklu autostradowym. Zwiększona temperatura i ciśnienie w cylindrze sprzyjają powstawaniu NO_x . Emisja THC uwarunkowana jest występowaniem globalnych i lokalnych niedoborów tlenu mających wpływ na reakcję spalania niezupełnego i niecałkowitego (rys. 9.5b).



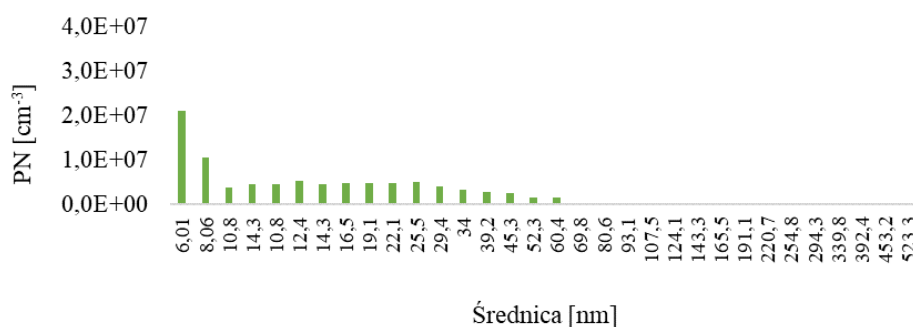
Rys. 9.5. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 1 układu wylotowego: a) NO_x , b) THC; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Natężenie emisji PM_m charakteryzuje się występowaniem obszarów o zwiększonych wartościach w cyklu miejskim i autostradowym. Największe natężenie emisji PM_m zmierzono w początkowej fazie testu, która charakteryzuje się niedostateczną temperaturą reaktora i zmniejszoną skutecznością utleniania cząstek w cyklu miejskim (rys. 9.6). Wynika to z przebiegu testu i zmian obciążenia silnika.



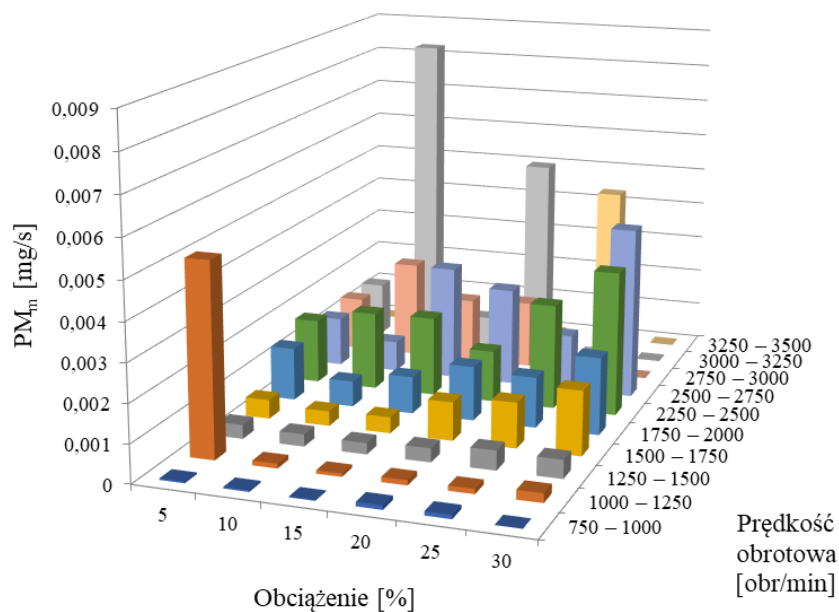
Rys. 9.6. Natężenie emisji PM_m w odwzorowanym teście dla konfiguracji 1 układu wylotowego; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Rozkład wymiarowy wskazuje na zwiększoną emisję PN o małych średnicach (rys. 9.7). Oznacza to emisję cząstek, które powstały w procesie niecałkowitego i niezupełnego spalania mieszanki i nie uległy jeszcze aglomeracji.

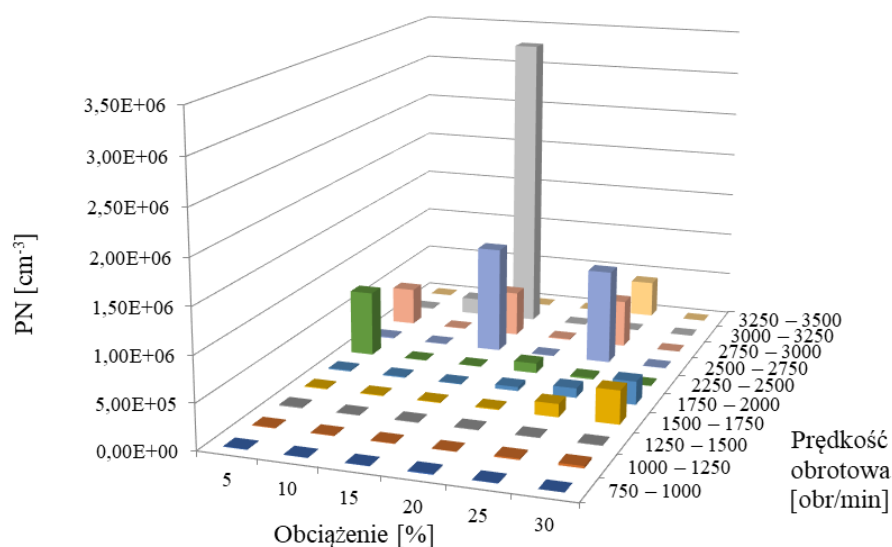


Rys. 9.7. Rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych w odwzorowanym teście dla konfiguracji 1 układu wylotowego

Charakterystyka natężenia emisji PM_m w zakresie obciążenia i prędkości obrotowej wału korbowego ilustruje zakresy o zwiększonej intensywności emisji: obciążenie 5% dla prędkości obrotowej w przedziale 1000–1250 obr/min, obciążenie 10 i 20% dla prędkości obrotowej w przedziale 3000–3250 obr/min i obciążenie 30% dla prędkości obrotowej w przedziale 2250–2750 obr/min. Poza dużą wartością zaobserwowaną dla punktów pracy silnika na biegu jałowym, największy udział w całym teście ma emisja cząstek w warunkach odpowiadających całemu zakresowi obciążenia oraz wyższym prędkościom obrotowym (rys. 9.8). Najwięcej PN zostało wyemitowanych podczas pracy silnika przy średnich i dużych prędkościach obrotowych w częściowym zakresie obciążeń (rys. 9.9).



Rys. 9.8. Natężenie emisji PM_m w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 1 układu wylotowego w odwzorowanym teście

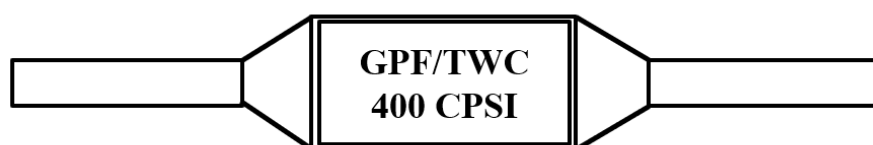


Rys. 9.9. Stężenie PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 1 układu wylotowego w odwzorowanym teście

Wartości uzyskane dla małych obciążeń odpowiadają poruszaniu się z małą prędkością pojazdu w kongestii (obciążenie silnika 5% dla prędkości obrotowej w przedziale 2250–2500 obr/min). Największą wartość, kilkukrotnie przewyższającą pozostałe, uzyskano dla obciążenia 15% w zakresie prędkości obrotowej 3000–3250 obr/min. Prawdopodobną przyczyną była praca silnika w stanach nieustalonych w zakresie zaprezentowanym na wykresie (rys. 9.9).

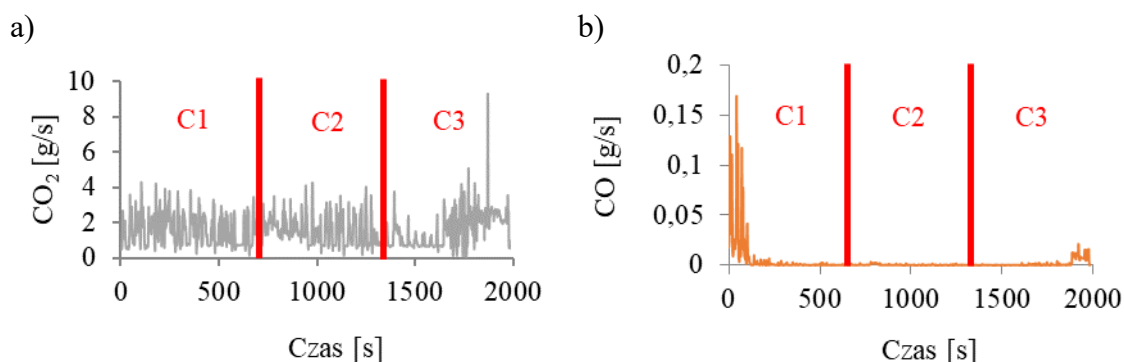
Konfiguracja nr 2

Kolejną badaną konfiguracją był komercyjny filtr GPF/TWC seryjnie stosowany w silniku przyjętym do badań (rys. 9.10).



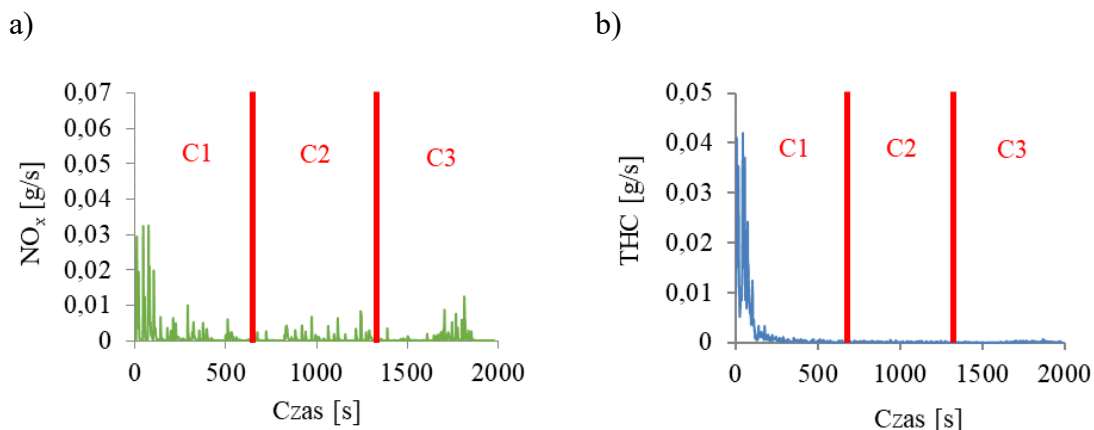
9.10. Schemat układu badawczego z komercyjnym nośnikiem ceramicznym typu *wall-through*

Natężenie emisji CO₂ w cyklu miejskim było równomierne i odpowiadało najmniejszym prędkościom obrotowym wału korbowego przy zróżnicowanym obciążeniu silnika (rys. 9.11a). Zwiększenie obciążenia w cyklu pozamiejskim skutkowało większym natężeniem emisji CO₂, aż do osiągnięcia wartości maksymalnych charakteryzujących cykl autostradowy. W przypadku CO zauważono dużą rozbieżność pomiędzy natężeniem emisji w początkowej fazie cyklu miejskiego, a pozostałymi cyklami (rys. 9.11b).



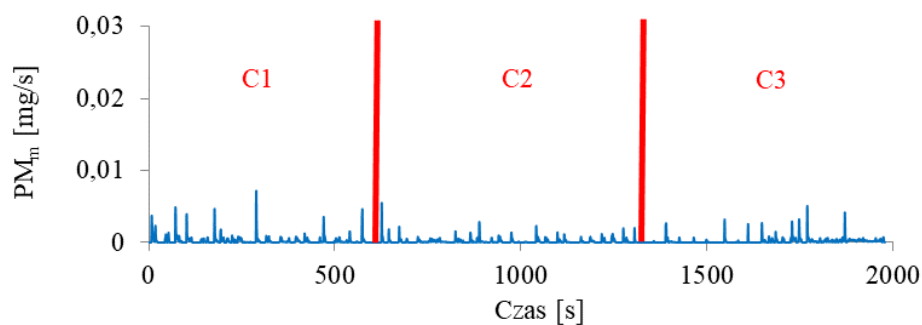
Rys. 9.11. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 2 układu wylotowego: a) CO₂, b) CO; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Charakterystyka pracy silnika w cyklu miejskim skutkuje niedostateczną temperaturą układu oczyszczania gazów wylotowych, a tym samym ograniczoną sprawnością układu katalityczno-filtrującego w zakresie redukcji NO_x. Tylko część reakcji zachodzących w filtrze wynikała z jego katalitycznych właściwości, efektem czego mogło być dwukrotnie większe natężenie emisji na początku testu w porównaniu do fazy końcowej (rys. 9.12a). Analogicznie do natężenia emisji CO spowodowanej niepełnym i niecałkowitym spalaniem mieszanki największe natężenie emisji THC zarejestrowano dla pierwszej części testu odpowiadającej jeździe w warunkach miejskich (rys. 9.12b).



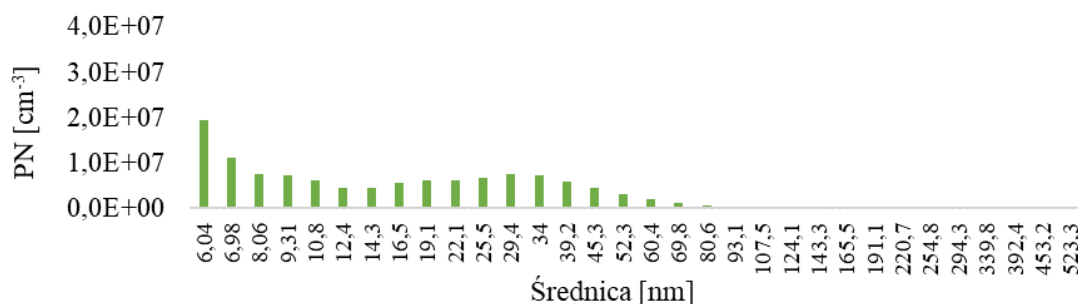
Rys. 9.12. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 2 układu wylotowego: a) NO_x , b) THC; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Wartość natężenia emisji PM_m dla komercyjnego GPF/TWC (0,007 mg/s) jest ponad czterokrotnie mniejsza w porównaniu z konfiguracją 1 (0,03 mg/s). Zwiększona emisja w pierwszym i ostatnim cyklu wynika z warunków pracy silnika w cyklu miejskim i zwiększonych obciążeniach w warunkach autostradowych (rys. 9.13).



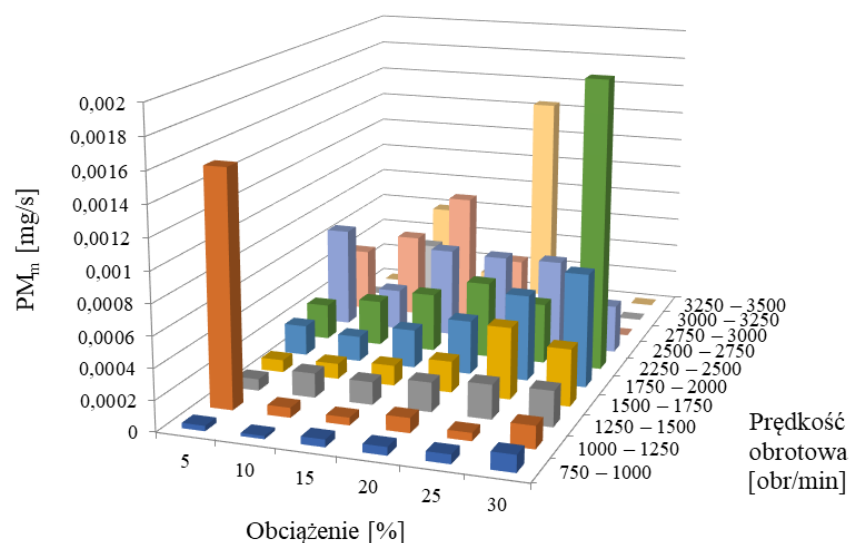
Rys. 9.13. Natężenie emisji PM_m w odwzorowanym teście dla konfiguracji 2 układu wylotowego; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Przesunięcie wartości maksymalnych PN w kierunku cząstek o małych średnicach jest zjawiskiem charakterystycznym dla silników SI DI. Rozkład wymiarowy ilustruje największy udział cząstek o średnicy 6,04 nm (rys. 9.14). Pomimo najmniejszej, ze wszystkich konfiguracji, emisji PM kształt rozkładu wymiarowego dowodzi zasadności wprowadzenia ich ograniczeń w ujęciu liczbowym.

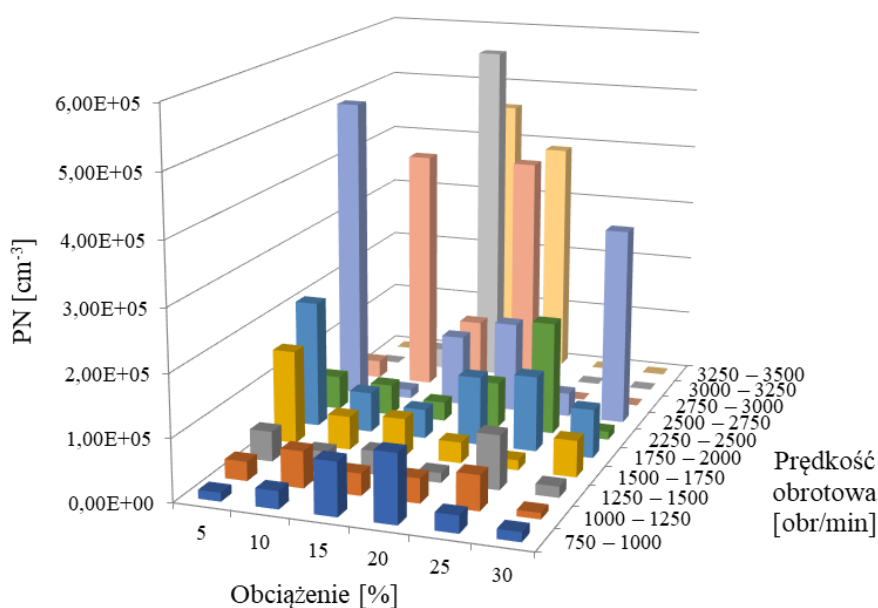


Rys. 9.14. Rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych w odwzorowanym teście dla konfiguracji 2 układu wylotowego

Natężenie emisji PM_m w zakresie obciążenia i prędkości obrotowej wału korbowego dzieli się na trzy zakresy. Pierwszy z nich odzwierciedla pracę silnika z obciążeniem 5–30% i prędkością obrotową 750–1250 obr/min (rys. 9.15). Największą wartość w tym przedziale zarejestrowano dla najmniejszej wartości obciążenia silnika i prędkości obrotowej odpowiadającej pracy na biegu jałowym. Pozostałe wartości są kilkakrotnie niższe, co świadczy o wpływie wzrostu obciążenia na zwiększenie sprawności filtra cząstek stałych. W przedziale drugim 1250–2750 obr/min emisja ma charakter równomierny. Kilkukrotny wzrost zarejestrowanych wartości nastąpił w przedziale trzecim 2750–3250 obr/min. Stężenie PN jest największe w zakresie prędkości obrotowych powyżej 2000 obr/min i obciążenia powyżej 20% (rys. 9.16).



Rys. 9.15. Natężenie emisji PM_m w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 2 układu wylotowego w odwzorowanym teście



Rys. 9.16. Stężenie PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 2 układu wylotowego w odwzorowanym teście

Z charakterystyki wynika, że małe prędkości obrotowe mają sumarycznie mniejszy wpływ na emisję PN w porównaniu z wartościami prędkości zbliżonymi do maksymalnych.

9.1.3. Badania emisji z użyciem prototypowych nośników metalowych

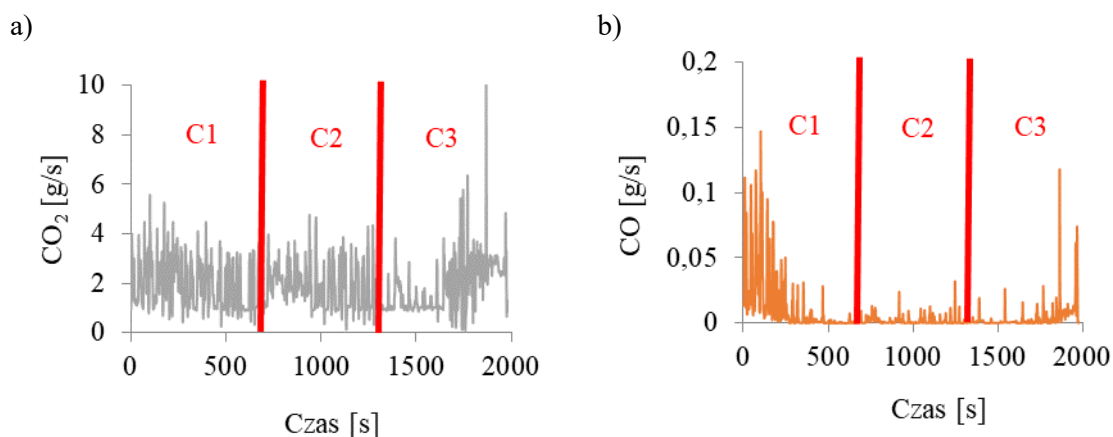
Konfiguracja 3

Pierwszym przebadanym filtrem z nośnikiem metalowym był prototypowy GPF/TWC wykonany na potrzeby realizacji rozprawy doktorskiej. Konfiguracja 3 składała się z jednego elementu oczyszczania gazów wylotowych znajdującego się w układzie wylotowym silnika użytego do badań (rys. 9.17). Badania wykonano w celu porównania skuteczności ograniczania emisji gazów wylotowych z konfiguracjami komercyjnymi.



Rys. 9.17. Schemat układu oczyszczania gazów wylotowych z prototypowym nośnikiem metalowym 200 CPSI

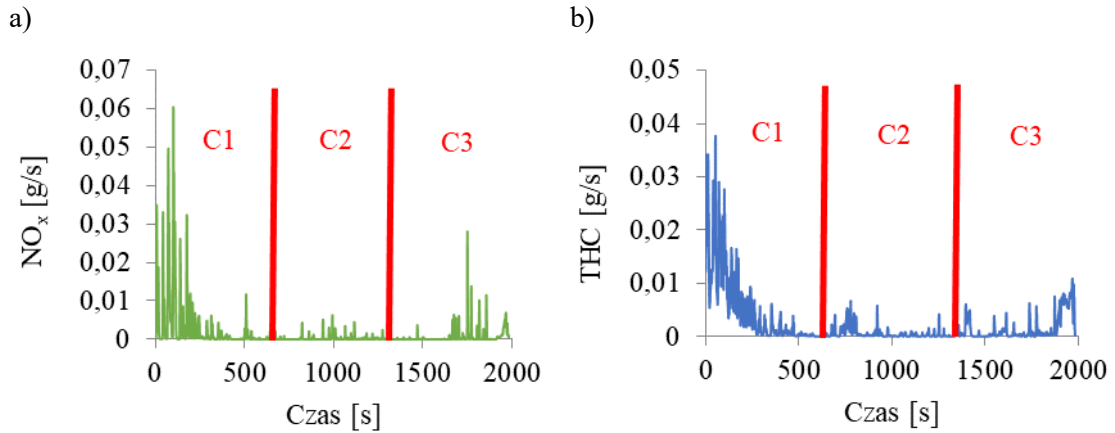
Największą wartość natężenia emisji CO₂, wynoszącą 10,9 g/s, zarejestrowano dla cyklu autostradowego (rys. 9.18a). Przyczyną intensyfikacji emisji było zwiększone zużycie paliwa. Emisja CO w pierwszym cyklu jest kilkukrotnie większa niż w pozostałych i osiąga maksymalną wartość 0,15 g/s. Możliwą przyczyną ograniczenia emisji CO w drugim i trzecim cyklu było osiągnięcie temperatury *light-off* odpowiadającej za osiągnięcie warunków decydujących o sprawności filtra na poziomie 50% (rys. 9.18b).



Rys. 9.18. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 3 układu wylotowego: a) CO₂, b) CO; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

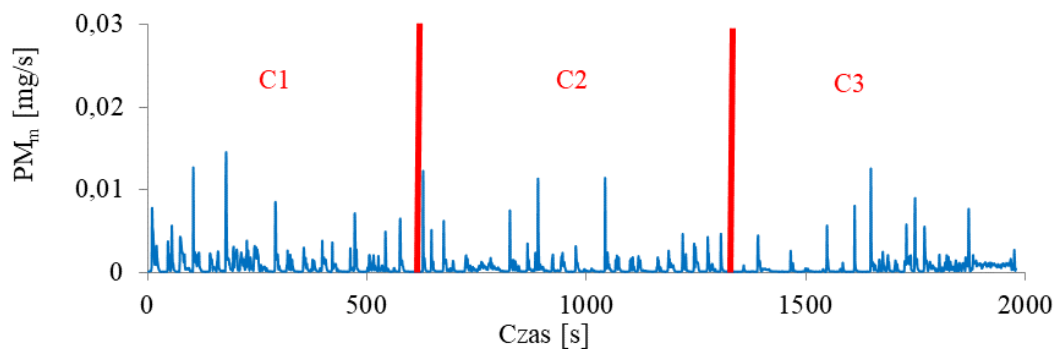
Największa wartość natężenia emisji NO_x w konfiguracji 3 (0,06 g/s) jest dwukrotnie większa w porównaniu z konfiguracją 2 (0,03 g/s). Przebieg charakterystyki zbliżony

jest do poprzednich rozwiązań (konfiguracja 1 i 2) i wykazuje się zwiększeniem wartości w początkowym i końcowym etapie testu – cykle: miejski i autostradowy (rys. 9.19a). Maksymalne natężenie emisji THC (0,04 g/s) jest 2 razy większe w porównaniu z komercyjnym TWC (0,02 g/s), co świadczy o większej sprawności utleniania THC w konfiguracji 1 od początku trwania testu (rys. 9.19b).



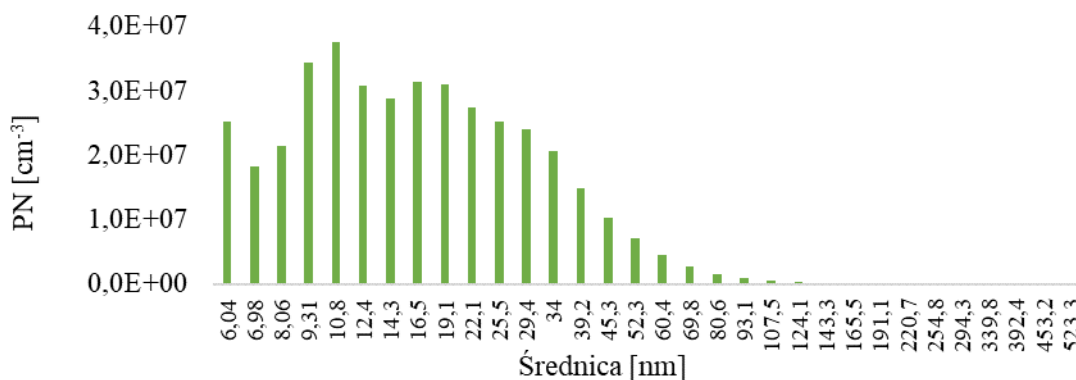
Rys. 9.19. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 3 układu wylotowego: a) NO_x, b) THC; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Maksymalna wartość natężenia emisji PM_m w konfiguracji 3 (0,01 mg/s) była blisko dwukrotnie większa niż w przypadku komercyjnego filtra GPF/TWC (0,007 mg/s). Natężenie emisji w każdym cyklu utrzymywało się na zbliżonym poziomie, co świadczy o braku wpływu działania filtra na jego ograniczenie pomimo wzrostu temperatury układu (rys. 9.20).



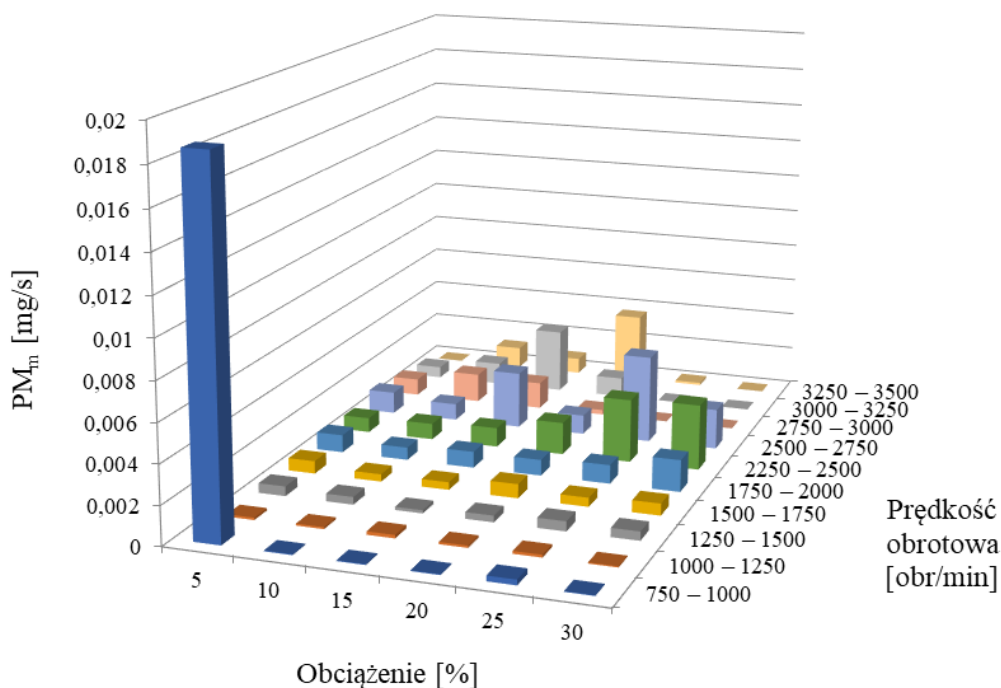
Rys. 9.20. Natężenie emisji PM_m w odwzorowanym teście dla konfiguracji 3 układu wylotowego; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl pozamiejski

W konfiguracji 3 odnotowano zwiększone wartości PN dla cząstek do średnicy 34 nm (rys. 9.21). Zastosowanie nośnika metalowego spowodowało zmianę kształtu rozkładu wymiarowego. Pomimo zwiększonej liczby emitowanych cząstek nie zaobserwowano dominacji cząstek o najmniejszych średnicach, które są najbardziej szkodliwe dla środowiska i zdrowia człowieka. Możliwą przyczyną było szybsze osiągnięcie temperatury *light-off* przez nośnik metalowy i utlenianie cząstek o małych średnicach w wyniku zderzenia ze ściankami kanału.

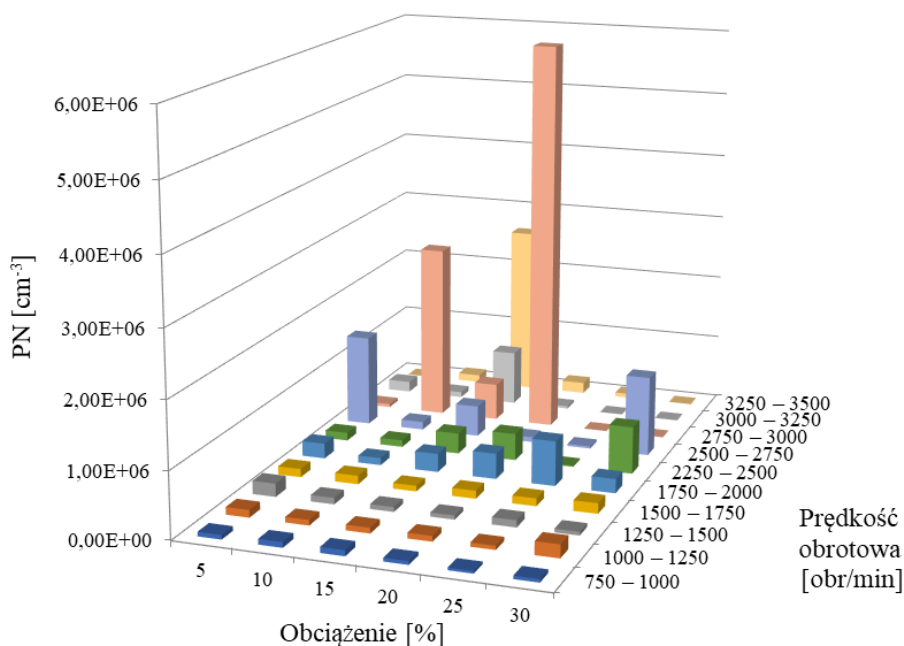


Rys. 9.21. Rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych w odwzorowanym teście dla konfiguracji 3 układu wylotowego

Zwiększone natężenie emisji PM_m w obszarze małych obciążeń i prędkości obrotowych wału korbowego mogło być wywołane niską temperaturą panującą w układzie wylotowym, co świadczy o dużym wpływie parametrów pracy niedogrzanego silnika na niedostateczną sprawność filtra (rys. 9.22). W zakresie obciążeń 15–30% i prędkości obrotowej w przedziale 2500–2750 obr/min zauważono tendencję do zwiększania się natężenia emisji wraz ze wzrostem obciążenia, co jest zjawiskiem charakterystycznym przy zwiększaniu prędkości pojazdu. Największe wartości stężenia PN przypadają na obciążenie silnika w przedziale 10–20% i prędkość obrotową wału korbowego powyżej 1750 obr/min (rys. 9.23). Są to wartości typowe dla poruszania się w warunkach miejskich. Prędkość obrotowa powyżej 2500 obr/min skutkuje zwiększeniem PN niezależnie od obciążenia.



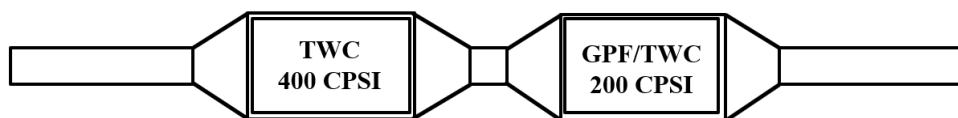
Rys. 9.22. Natężenie emisji PM_m w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 3 układu wylotowego w odwzorowanym teście



Rys. 9.23. Stężenie PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 3 układu wylotowego w odwzorowanym teście

Konfiguracja 4

Założeniem konfiguracji 4 było umieszczenie w układzie wylotowym dwóch elementów wykonanych z użyciem nośników metalowych. Pierwszym z nich był reaktor TWC 400 CPSI wspomagający reakcje utleniania CO, HC i redukcji NO_x. Drugim elementem był prototypowy GPF/TWC pełniący funkcję filtra (rys. 9.24).

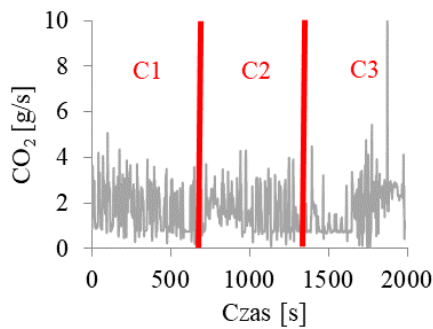


Rys. 9.24. Schemat układu oczyszczania gazów wylotowych z reaktorem TWC 400 CPSI i prototypowym nośnikiem metalowym GPF/TWC 200 CPSI

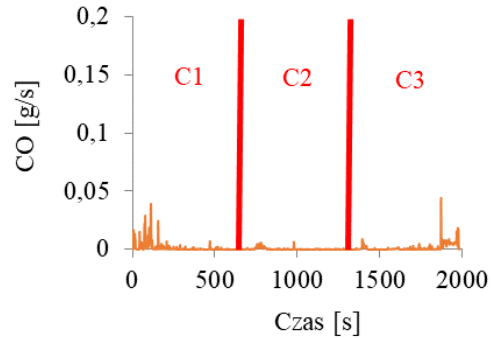
Najmniejszym natężeniem emisji CO₂ w całym teście charakteryzował się cykl pozamijski (rys. 9.25a). Zwiększenie wartości w cyklu autostradowym pod koniec testu wynikało ze zwiększenia zużycia paliwa w punktach pracy z największym obciążeniem i prędkością obrotową wału korbowego. Zastosowanie TWC+GPF/TWC przyczyniło się do ograniczenia emisji CO w porównaniu ze wszystkimi rozpatrywanymi wcześniej konfiguracjami. Zaobserwowano obszary o zwiększonym natężeniu emisji w początkowej fazie cyklu miejskiego i końcowej autostradowego (rys. 9.25b). Maksymalna wartość natężenia emisji CO podczas badania konfiguracji 4 (0,04 g/s) była pięciokrotnie mniejsza w porównaniu do konfiguracji 1 (0,2 g/s). Maksymalne natężenie emisji NO_x było najmniejsze ze wszystkich badanych konfiguracji (rys. 9.26a). Charakter zmian pod wpływem zmiennych parametrów obciążenia i prędkości obrotowej był najbardziej zrównoważony. Świadczy to o prawidłowym działaniu układu na redukcję NO_x podczas trwania testu. Sprawność działania reaktora potwierdza także blisko sześciokrotne zmniejszenie maksymalnego natężenia emisji

THC w porównaniu z konfiguracją 2 i 3 oraz trzykrotnie względem konfiguracji 1 (rys. 9.26b).

a)

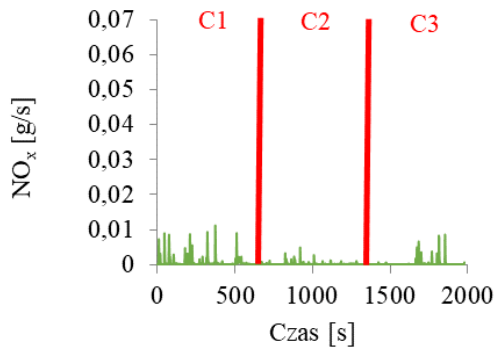


b)

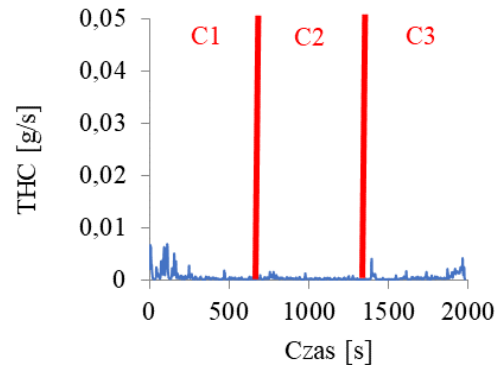


Rys. 9.25. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 4 układu wylotowego: a) CO₂, b) CO; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

a)

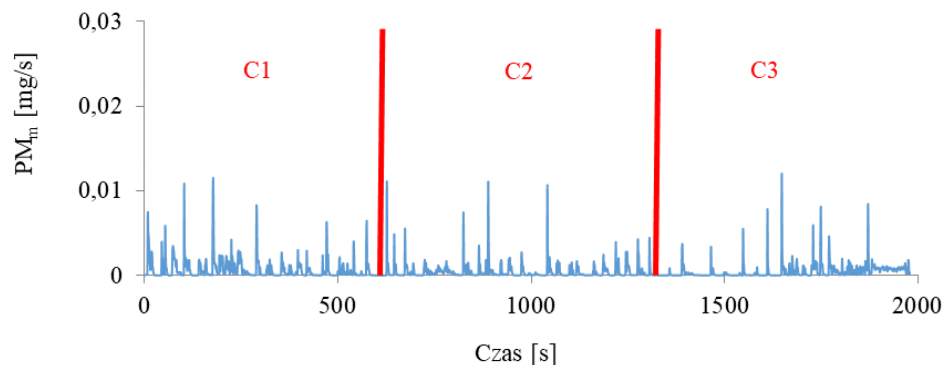


b)



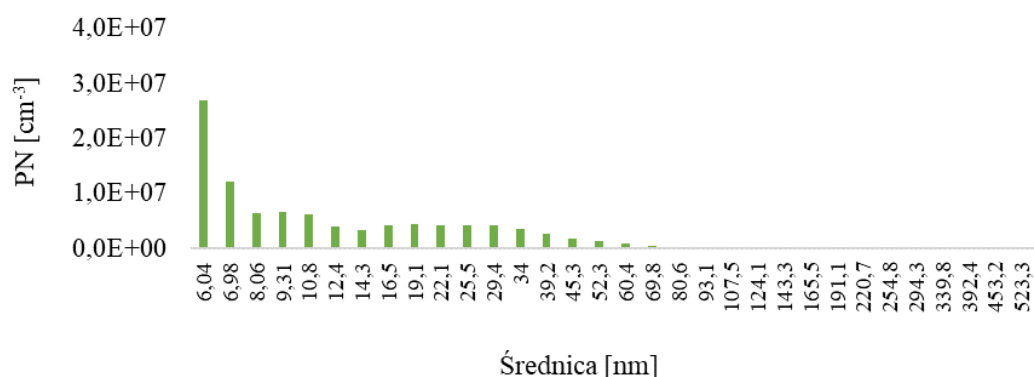
Rys. 9.26. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 2 układu wylotowego: a) NO_x, b) THC; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Maksymalne natężenie emisji PM_m w konfiguracji 4 (0,01 mg/s) stanowi trzecią najmniejszą wartość w porównaniu z pozostałymi konfiguracjami. Świadczy to o niedostatecznej pracy układu w tej konfiguracji w zakresie ograniczania natężenia emisji PM_m. Przebieg natężenia emisji podczas całego testu jest zrównoważony, co świadczy o zbliżonej sprawności badanej konfiguracji niezależnie od parametrów pracy silnika (rys. 9.27).



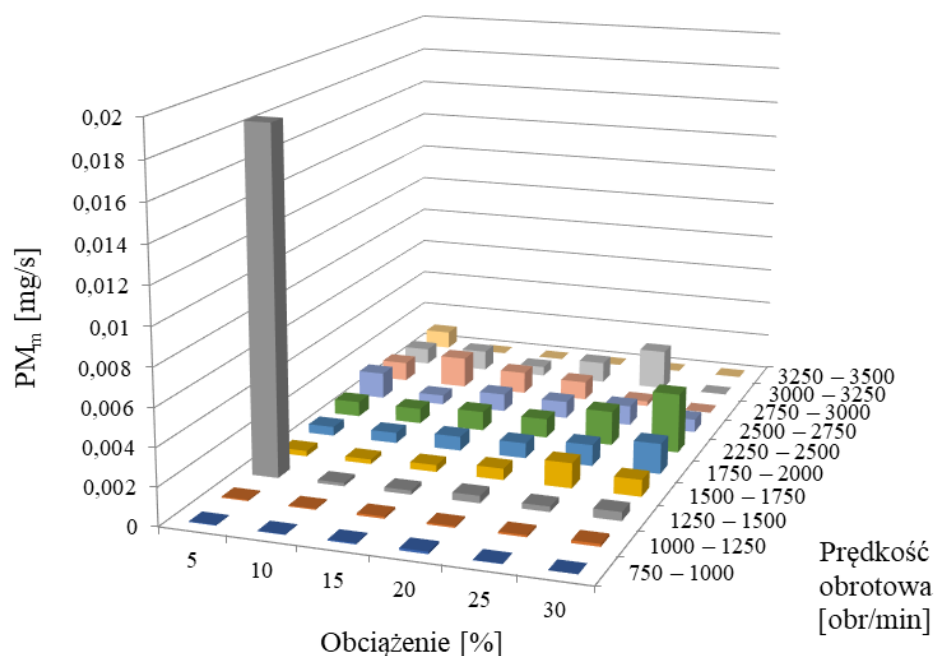
Rys. 9.27. Natężenie emisji PM_m w odwzorowanym teście dla konfiguracji 4 układu wylotowego; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Pomimo dużego ograniczenia cząstek o średnicach powyżej 22,1 nm, wartości uzyskane dla średnic poniżej 8,06 nm oznaczają intensywną emisję najbardziej niebezpiecznych dla zdrowia nanocząstek (rys. 9.28).

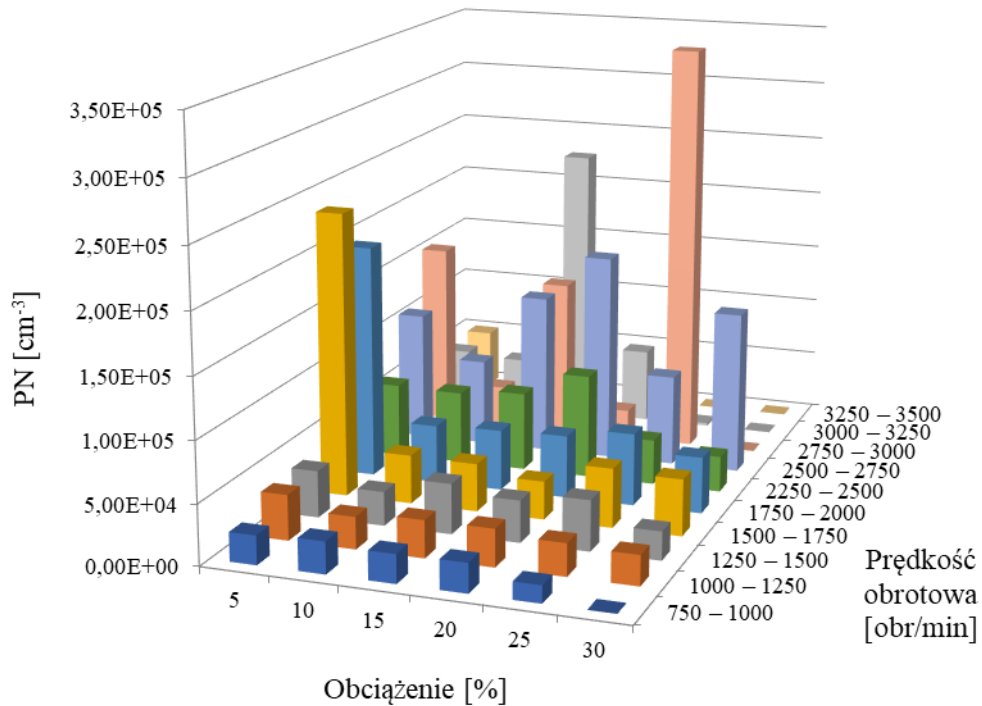


Rys. 9.28. Rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych w odwzorowanym teście dla konfiguracji 4 układu wylotowego

Maksymalna wartość natężenia emisji PM_m różni się od pozostałych wyników około dziesięciokrotnie. Wynik ten uzyskano dla obciążenia 5% i prędkości obrotowej w przedziale 1250–1500 obr/min (rys. 9.29). Wartości te odpowiadają eksploatacji w warunkach miejskich podczas kongestii. Natężenie emisji PM_m w takim przypadku jest szczególnie niepożądane z uwagi na narażenie osób znajdujących się w pobliżu jezdni. Natężenie emisji PM_m powyżej 1500 obr/min osiąga zbliżone wartości dla całego zakresu obciążeń. Najwięcej PN zmierzono podczas pracy z małym obciążeniem w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego od 1500–1700 obr/min (rys. 9.30).



Rys. 9.29. Natężenie emisji PM_m w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 4 układu wylotowego w odwzorowanym teście

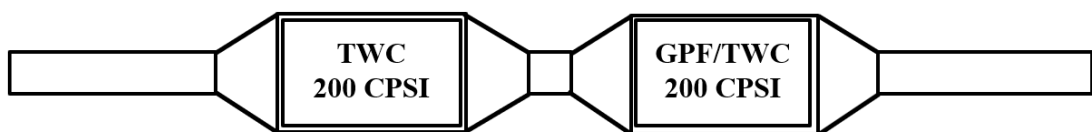


Rys. 9.30. Steżenie PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 4 układu wylotowego w odwzorowanym teście

Poza tym przypadkiem, wpływ równoczesnego zwiększania prędkości obrotowej i obciążenia powodował stopniowy przyrost PN, aż do osiągnięcia wartości odpowiadających pracy silnika w warunkach największych prędkości pojazdu.

Konfiguracja 5

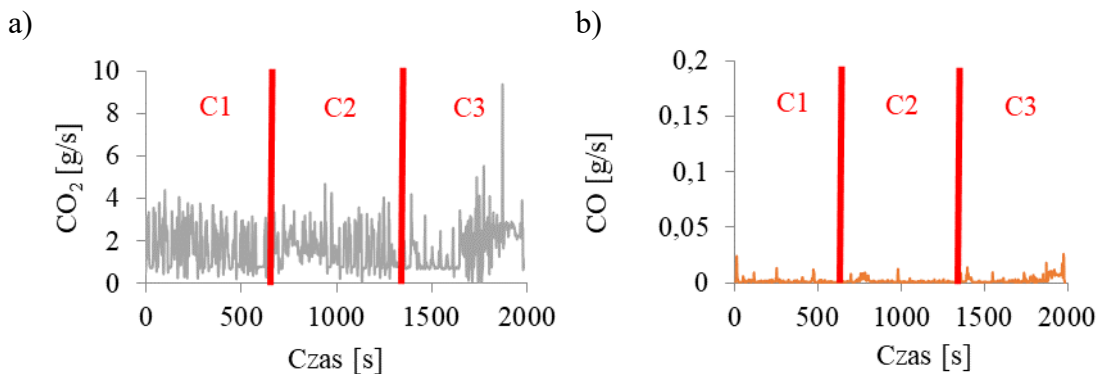
W konfiguracji 5 ponownie zastosowano dwa elementy z użyciem nośników metalowych (TWC+GPF/TWC), wymieniając pierwszy z nich na reaktor o mniejszej liczbie CPSI (200) (rys. 9.31).



Rys. 9.31. Schemat układu oczyszczania gazów wylotowych z reaktorem TWC 200 CPSI i prototypowym nośnikiem metalowym GPF/TWC 200 CPSI

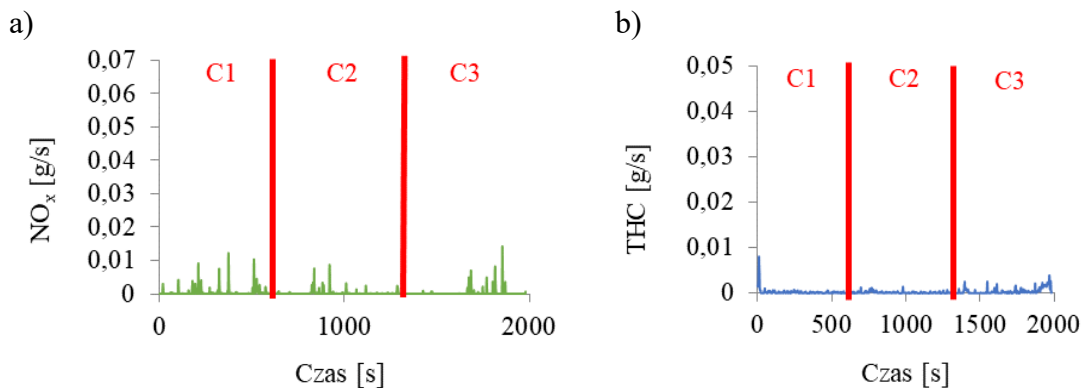
Natężenie emisji CO₂, czyli pośrednio zużycie paliwa, wykazuje brak wyraźnej różnicy w uzyskanych wartościach pomiędzy badanymi konfiguracjami. Stwierdzone zmniejszenie emisji CO₂ miało miejsce podczas końcowej fazy cyklu pozamiejskiego, poprzedzającej cykl autostradowy, który charakteryzował się pracą z największą prędkością obrotową wału korbowego i obciążeniem silnika (rys. 9.32a). Maksymalna wartość natężenia emisji CO wyniosła 0,03 g/s i była najmniejsza ze wszystkich badanych konfiguracji. Zastosowanie reaktora TWC 200 CPSI z nośnikiem metalowym spowodowało, że wartość maksymalna zarejestrowana w pierwszej fazie testu zbliżona była do wyników otrzymanych w warunkach maksymalnego obciążenia i prędkości

obrotowej (rys. 9.32b). W pozostałych konfiguracjach zauważono wyraźną dominację emisji CO w pierwszej fazie testu, za wyjątkiem konfiguracji 1, w której wartości emisji były zbliżone do maksymalnej w każdym cyklu.



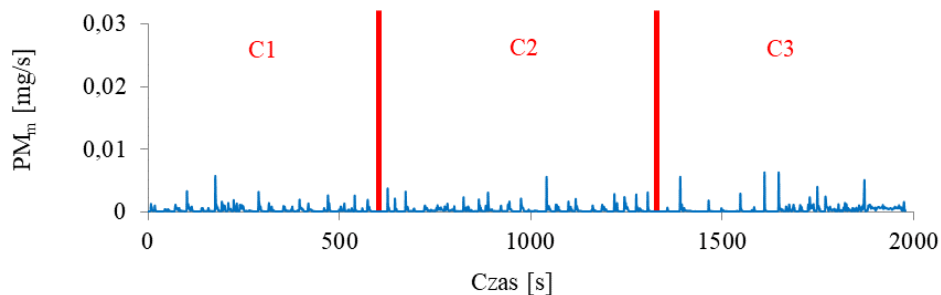
Rys. 9.32. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 5 układu wylotowego: a) CO₂, b) CO; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Natężenie emisji NO_x charakteryzowało się podobnym przebiegiem dla konfiguracji 4 i 5. Zastosowanie reaktora TWC z nośnikiem metalowym umożliwiło osiągnięcie temperatury niezbędnej do przeprowadzenia reakcji redukcji w początkowej fazie testu i przyczyniło się do ograniczenia emisji NO_x od początku testu (rys. 9.33a). Umieszczenie reaktora TWC przed filtrem skutkowało sześciokrotnym zmniejszeniem maksymalnej wartości NO_x (0,01 g/s) w całym teście w porównaniu z konfiguracją zawierającą tylko prototypowy filtr GPF/TWC (0,06 g/s). Z uwagi na zbliżone przyczyny powstawania CO i THC w początkowej fazie testu odpowiadającej cyklowi miejskiemu, w konfiguracjach 4 i 5 zarejestrowano maksymalną wartość emisji THC kilkukrotnie większą niż w pozostałych cyklach (rys. 9.33b).



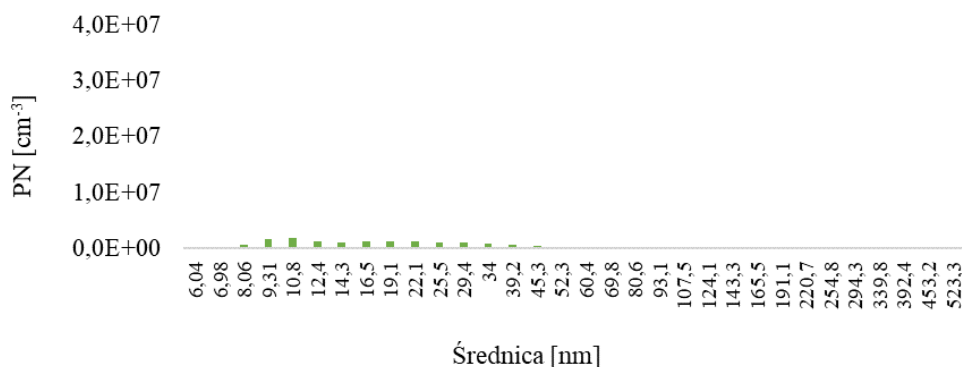
Rys. 9.33. Natężenie emisji w odwzorowanym teście dla konfiguracji 5 układu wylotowego: a) NO_x, b) THC; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl autostradowy

Dla konfiguracji 5 natężenie emisji PM_m było zrównoważone w czasie całego testu (rys. 9.34). Największą wartość zarejestrowano dla cyklu autostradowego (0,006 mg/s). Wartość ta zbliżona była do wyniku uzyskanego dla konfiguracji 2 (0,007 mg/s) (komercyjny GPF/TWC). W porównaniu do konfiguracji 1 (0,03 mg/s) (komercyjny TWC) maksymalne natężenie emisji PM było ponad czterokrotnie większe. Potwierdza to niedostateczne działanie reaktora TWC jako jedyne go elementu układu oczyszczania w zakresie ograniczenia natężenia emisji PM z gazów wylotowych silników SI DI.

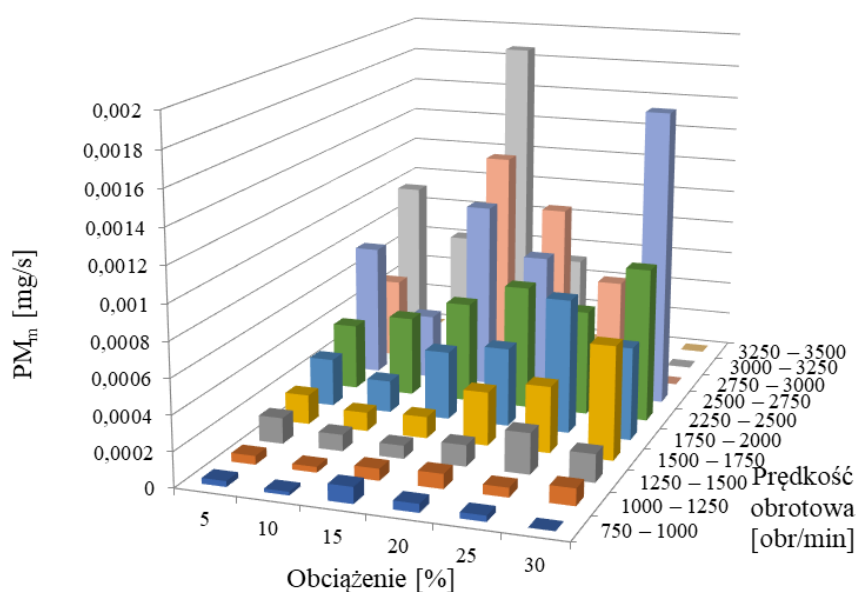


Rys. 9.34. Natężenie emisji PM_m w odwzorowanym teście dla konfiguracji 5 układu wylotowego; C1 – cykl miejski, C2 – cykl pozamiejski, C3 – cykl pozamiejski

Zmniejszenie liczby cel nośnika TWC spowodowało ograniczenie PN o średnicy poniżej 8,06 nm (rys. 9.35). W wyniku tego nastąpiła zmiana kształtu rozkładu wymiarowego średnic PM. Konfiguracja 5 charakteryzuje się największą skutecznością ograniczania PN w porównaniu do pozostałych układów. Natężenie emisji PM_m w cyklu miejskim osiągnęło wartości minimalne (rys. 9.36). Jest to sytuacja korzystna z uwagi na bezpośrednie zagrożenie emisją PM w obszarach zabudowanych.

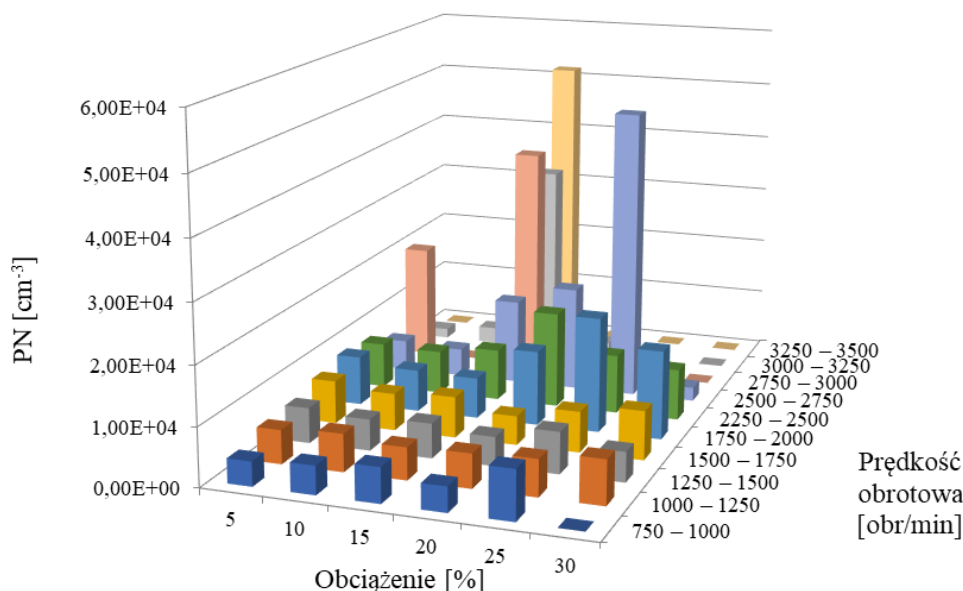


Rys. 9.35. Rozkład wymiarowy średnic PM w odwzorowanym teście dla konfiguracji 5 układu wylotowego



Rys. 9.36. Natężenie emisji PM_m w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 5 układu wylotowego w odwzorowanym teście

Zwiększenie emisji nastąpiło po przekroczeniu prędkości obrotowej 1500 obr/min. Największe wartości uzyskano dla przedziału 2500–3250 obr/min, który odzwierciedla prędkości dla cyklu autostradowego. Stężenie PN było największe dla obciążenia 15% i prędkości obrotowej w przedziale 3250–3500 obr/min (rys. 9.37).

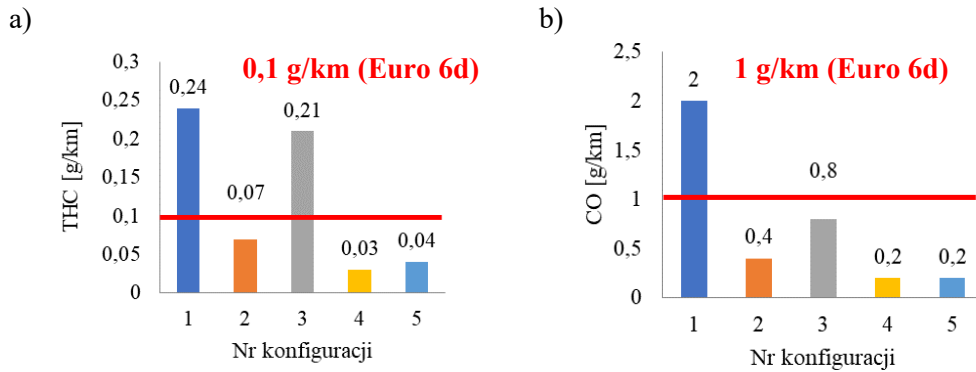


Rys. 9.37. Stężenie PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika dla konfiguracji 5 układu wylotowego w odwzorowanym teście

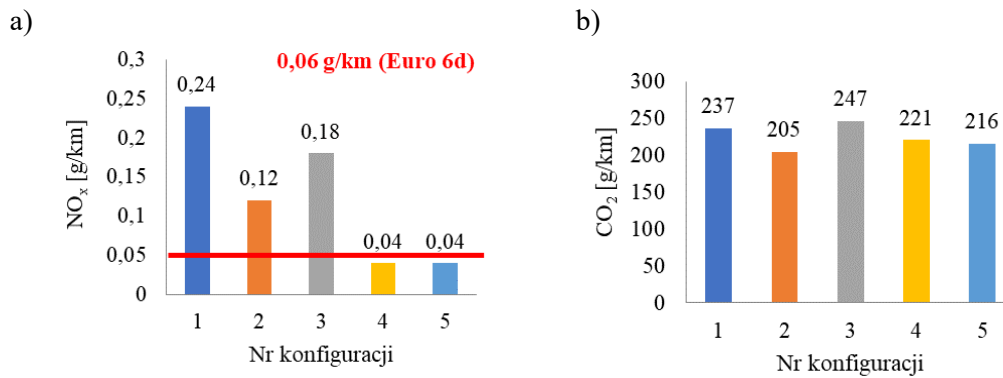
9.2. Analiza wyników badań

Analiza ekologicznych parametrów polegała na określeniu drogowej emisji szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych w odniesieniu do wymagań normy Euro 6d. Emisję drogową obliczono na podstawie masy danego związku oraz przebytej drogi, którą wyznaczono z przebiegu prędkości w odwzorowanych warunkach rzeczywistych na hamowni dynamicznej. Największą emisję THC (rys. 9.38a) zarejestrowano dla konfiguracji 1 (komercyjny reaktor TWC z nośnikiem ceramicznym). Skala zjawiska w przypadku konfiguracji 1 przełożyła się na odpowiednio większą emisję, niż w pozostałych układach. Analogiczną sytuację zaobserwowano dla drogowej emisji CO (rys. 9.38b), która dwukrotnie przekracza wartość dopuszczalną w przypadku konfiguracji 1 (0,24 g/km). Drogowa emisja THC została ponad dwukrotnie przekroczona także przez konfigurację 3 (0,21 g/km). Najmniejszą emisję drogową THC stwierdzono dla konfiguracji 4 i 5 z dwoma elementami w układzie wylotowym. Największą i jednakową skutecznością ograniczenia emisji CO wykazały się także konfiguracje 4 i 5 (rys. 9.38b). Wartość ta jest dziesięciokrotnie mniejsza od maksymalnej uzyskanej w teście dla konfiguracji 1, która jako jedyna nie spełniła normy Euro 6d. Jedynymi konfiguracjami, które spełniły wymagania normy emisji NO_x (rys. 9.39a) były 4 i 5 (0,04 g/km). Największą wartość uzyskano dla konfiguracji 1 (komercyjny TWC), która trzykrotnie przekroczyła wymaganą normę. Najmniejszą emisję CO₂ zanotowano dla konfiguracji 2 (rys. 9.39b). Znaczącą przyczyną był najmniejszy opór przepływu gazów wylotowych przez filtr ceramiczny. Należy zaznaczyć, że rząd wielkości emisji CO₂ w przypadku wszystkich badanych konfiguracji utrzymany jest na jednakowym poziomie. Nie zauważono

wpływu zastosowania dwóch elementów układu oczyszczania gazów wylotowych na znaczne zwiększenie emisji CO₂.

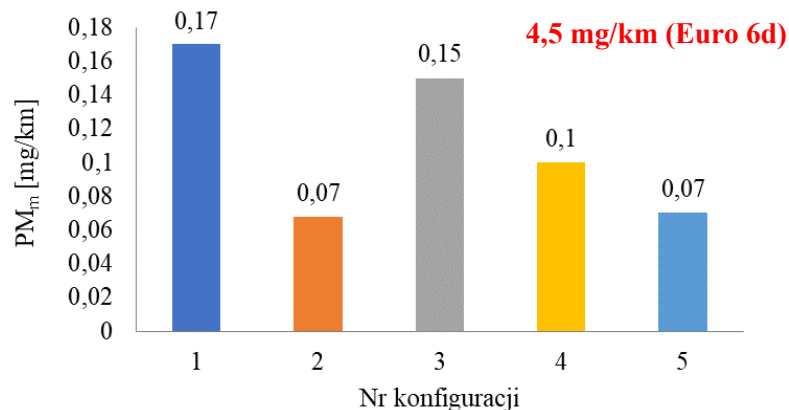


Rys. 9.38. Emisja drogowa dla badanych konfiguracji układu wylotowego w odniesieniu do normy Euro 6d: a) THC, b) CO



Rys. 9.39. Emisja drogowa dla badanych konfiguracji układu wylotowego: a) NO_x, (w odniesieniu do normy Euro 6d), b) CO₂

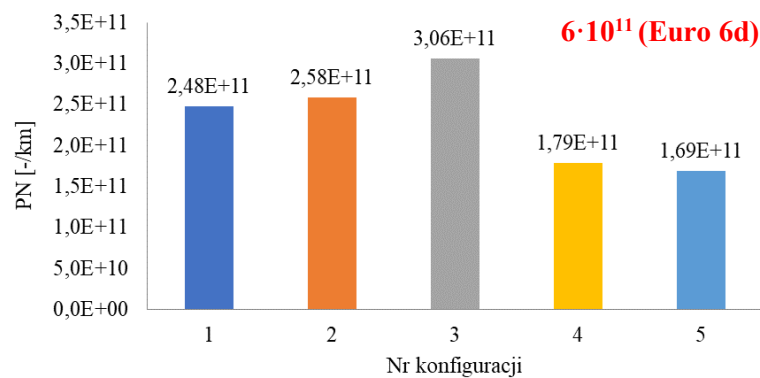
Dopuszczalna emisja drogowa PM_m (4,5 mg/km), nie została przekroczona przez żadną z badanych konfiguracji. Najmniejszą wartość stwierdzono dla konfiguracji 2 (rys. 9.40).



Rys. 9.40. Emisja drogowa PM_m dla badanych konfiguracji układu wylotowego. Kolorem czerwonym podano wartość dopuszczalną w normie Euro 6d

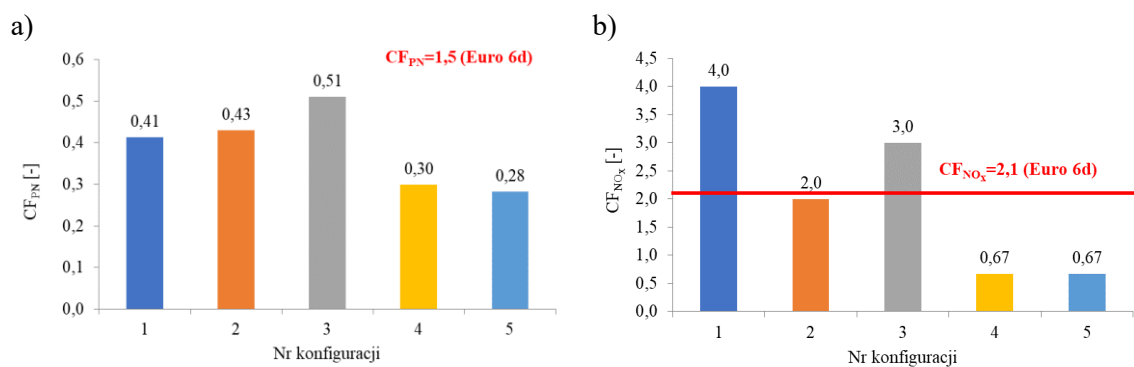
Komercyjny GPF/TWC zaprojektowano jako element dedykowany do badanego silnika. W przypadku komercyjnego TWC (konfiguracja 1) pierwotnym zastosowaniem

jest ograniczanie emisji gazowych składników, co znajduje odzwierciedlenie w największej emisji drogowej PM_m , która jest prawie trzykrotnie większa od konfiguracji 2. Działanie konfiguracji 5 jest zbliżone do komercyjnego układu oczyszczania gazów wylotowych. Potwierdza to skuteczność tego prototypowego rozwiązania w ograniczeniu emisji drogowej PM_m . Najmniejszą skutecznością ograniczenia emisji drogowej PN charakteryzuje się konfiguracja 3 (prototypowy GPF) (rys. 9.41). Prawdopodobną przyczyną znacznego przekroczenia był brak odpowiedniego pokrycia katalitycznego umożliwiającego zachodzenie reakcji utleniania na wymaganym poziomie. Po zastosowaniu w układzie dodatkowego elementu w postaci TWC w konfiguracji 4 i 5 wartość emisji ograniczono niemal dwukrotnie względem rozwiązań OEM. Konfiguracje 1 i 2, stanowiące komercyjne rozwiązania, wykazują zbliżoną skuteczność. Najmniejszą wartość emisji drogowej PN uzyskano dla konfiguracji 5 ($1,69 \cdot 10^{11}$). Z uwagi na duży margines związany z wartością dopuszczalną rozwiązanie to jest najbardziej korzystne.



Rys. 9.41. Emisja drogowa PN dla badanych konfiguracji układu wylotowego w odniesieniu do normy Euro 6d

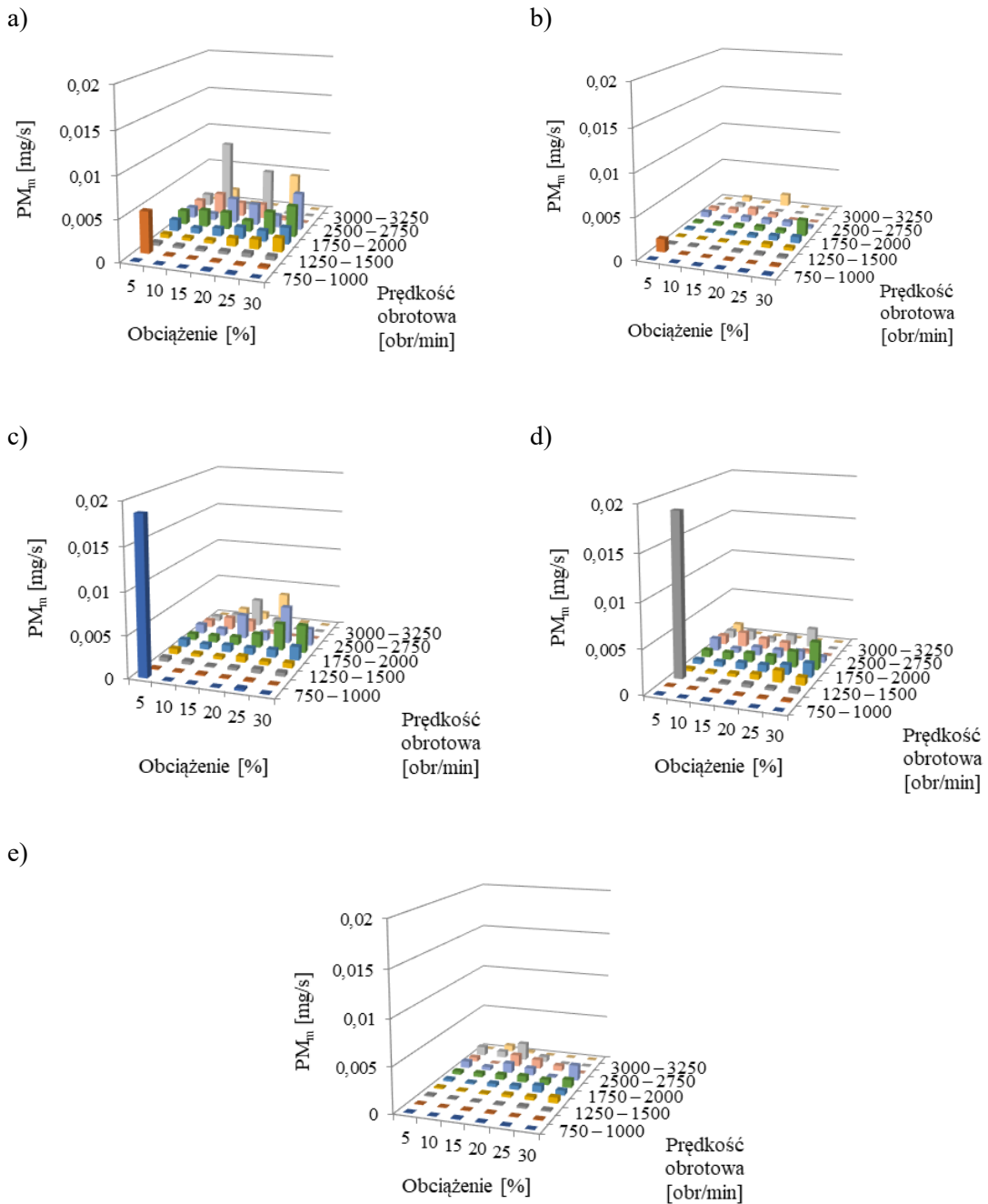
Największą wartość wskaźnika CF_{PN} (rys. 9.42a) uzyskano dla prototypowego filtra GPF/TWC (konfiguracja 3) Potwierdza to zasadność doposażenia układu wylotowego w reaktor katalityczny mający wpływ na zwiększenie skuteczności działania układu oczyszczania gazów wylotowych. Pomimo odniesienia wskaźników emisji NO_x do obecnej normy Euro, trzy na pięć badanych konfiguracji nie przekroczyły wartości dopuszczalnej, pomimo badań przeprowadzonych na silniku zaprojektowanym do spełnienia normy Euro 5 (rys. 9.42b).



Rys. 9.42. Wskaźnik emisji dla badanych konfiguracji: a) PN, b) NO_x

Zastosowanie TWC+GPF/TWC z nośnikami metalowymi w układzie wylotowym w konfiguracji 4 i 5 umożliwiło spełnienie wymagań w zakresie emisji drogowej dla wszystkich składników gazów wylotowych. Biorąc pod uwagę margines w przypadku każdego z ograniczeń można założyć, że nawet zwiększenie emisji spowodowane eksploatacją silnika nie spowoduje przekroczenia wartości dopuszczalnych.

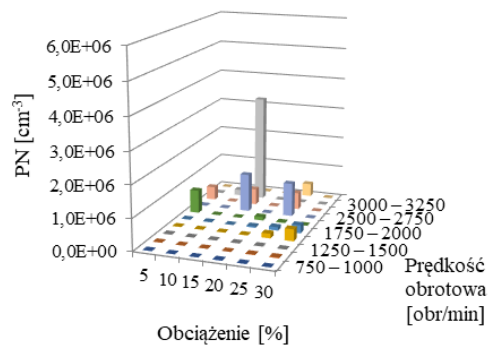
W celu porównania skuteczności filtracji badanych konfiguracji 1–5 zestawiono charakterystyki natężenia emisji PM_m oraz stężenia PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika w jednakowej skali odpowiedniej dla danego składnika gazów wylotowych. Najmniejszą sprawność filtracji PM_m wykazano dla konfiguracji 1 w całym zakresie obciążeń i powyżej 1500 obr/min (rys. 9.43a).



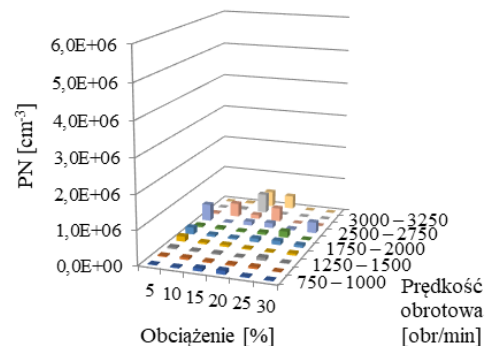
9.43. Natężenie emisji PM_m w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika w odwzorowanym teście dla poszczególnych konfiguracji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5

Konfiguracja 2 charakteryzuje się trzema obszarami o zwiększonej emisji PM_m: obciążenie 5% przy prędkości obrotowej w przedziale 1000–1250 obr/min, obciążenie 20% przy prędkości obrotowej w przedziale 3000–3250 obr/min, obciążenie 30% przy prędkości obrotowej w przedziale 2000–2250 obr/min (rys. 9.43b). Dla konfiguracji 3 wykazano najmniejszą skuteczność filtracji podczas pracy z minimalnym obciążeniem na biegu jałowym oraz drugim z kolei największym natężeniem emisji PM_m podczas pracy w całym teście (rys. 9.43c). Dla konfiguracji 4 zarejestrowano dużą rozbieżność pomiędzy wynikiem dla obciążenia równego 5% dla prędkości obrotowej w przedziale 1250–1500 obr/min, a pozostałymi punktami pracy silnika (rys. 9.43d). Największą sprawność filtracji odnotowano dla konfiguracji 5 podczas trwania całego testu (rys. 9.43e). Przebieg charakterystyki zbliżony jest do konfiguracji 2 (komercyjny GPF/TWC), z uwzględnieniem braku obszarów o zwiększonym natężeniu emisji dla konfiguracji 5. Porównanie charakterystyk stężenia PN wykazało najmniejszą sprawność filtracji dla konfiguracji 1 (rys.9.44a) i 3 (rys. 9.44c).

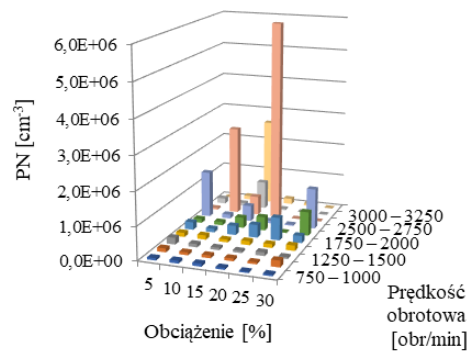
a)



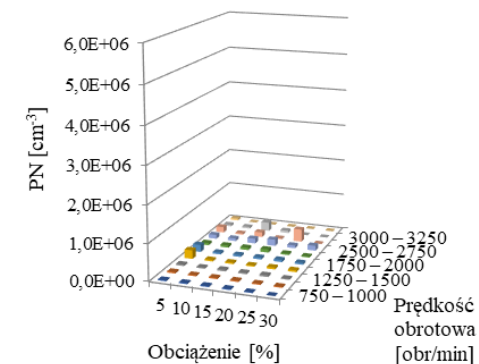
b)



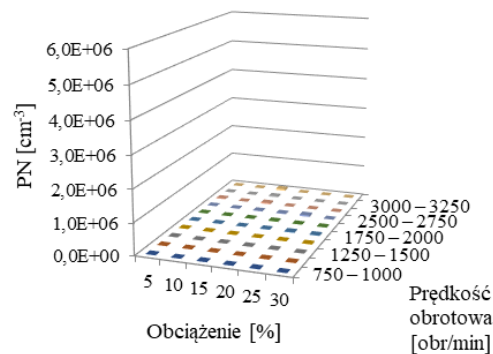
c)



d)



e)



9.44. Stężenie PN w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika w odwzorowanym teście dla poszczególnych konfiguracji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5

Maksymalna wartość stężenia PN dla konfiguracji 3 wynosiła $5,98 \cdot 10^6$ i kilkukrotnie przewyższyła wartości uzyskane dla pozostałych konfiguracji. Wynik uzyskano w warunkach obciążenia silnika na poziomie 20% dla prędkości obrotowej w przedziale 2500–2750 obr/min. Konfiguracje 2 (rys. 9.44b) 4 (rys. 9.44d) i 5 (rys. 9.44e) charakteryzowały się zbliżonym przebiegiem. Pierwszą z nich wyróżniała zwiększona emisja w zakresach prędkości obrotowych powyżej 2500 obr/min. Największą skuteczność filtracji PN zarejestrowano dla konfiguracji 5 (rys. 9.44e).

10. Podsumowanie i wnioski

W obliczu zwiększającego się udziału w rynku silników SI DI będących bezpośrednią przyczyną zwiększonej emisji nanocząstek pochodzących ze źródeł motoryzacyjnych do atmosfery, ośrodki badawcze na całym świecie skupione są na poszukiwaniu rozwiązania mającego znaczący wpływ na jej ograniczenie. Wraz z wprowadzeniem normy Euro 6d w styczniu 2021 r. nastąpił zakaz rejestrowania pojazdów niespełniających jej wymagań. Obostrzenie dotyczy także wyposażenia pojazdów w urządzenia monitorujące rzeczywiste zużycie paliwa (dla pojazdów z silnikami spalinowymi) i energii elektrycznej (dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych), które ma bezpośredni wpływ na wartość emisji poszczególnych składników gazów wylotowych. Z uwagi na stale zwiększającą się popularność silników SI DI producenci zobowiązani są do usprawniania ich technologii. Modyfikacja systemu bezpośredniego wtrysku benzyny związana jest z udoskonaleniem systemu spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w taki sposób, że układy stają się zbliżone do stosowanych w silnikach CI wysokociśnieniowych układów wtrysku oleju napędowego. Działanie to przyczynia się do powstawania w silnikach SI DI cząstek stałych o średnicach do kilkudziesięciu nanometrów. Odpowiedni dobór elementów układu oczyszczania gazów wylotowych polega na połączeniu oddziaływania na poszczególne składniki w aspekcie ich utleniania, redukcji i filtracji. W wyniku mniejszej bezwładności cieplnej nośników metalowych ich zastosowanie umożliwia wykorzystanie potencjału zachodzenia reakcji utleniania i redukcji szybciej niż w przypadku powszechnie stosowanych nośników ceramicznych. Zdecydowana większość zimnych rozruchów silnika odbywa się na obszarach miejskich, w pobliżu budynków mieszkalnych, dlatego możliwość ograniczenia emisji przez szybsze osiągnięcie temperatury *light-off* jest zjawiskiem pożądanym. W ramach dysertacji przebadano 5 konfiguracji układu oczyszczania gazów wylotowych, których skuteczność porównano w teście stanowiącym odwzorowanie rzeczywistego przejazdu zgodnego z wymaganiami procedury RDE. Dwie z badanych konfiguracji stanowiły komercyjne elementy układu oczyszczania gazów wylotowych (TWC+GPF/TWC). Pozostałe konfiguracje wyposażone były w prototypowe filtry i reaktory katalityczne wytworzone na potrzeby realizacji rozprawy doktorskiej z użyciem prototypowych nośników metalowych. Badania nośników komercyjnych wykonano w celu porównania skuteczności działania w zakresie ograniczenia gazowych składników gazów wylotowych i sprawności filtracji z wykonanymi prototypowymi konfiguracjami. Uzyskane wyniki badań umożliwiły potwierdzenie tezy pracy wskazującej na możliwość stosowania nośników metalowych jako zamienników powszechnie używanych filtrów z nośnikami ceramicznymi. Stwierdzono osiągnięcie celu rozprawy, którym było zaprojektowanie i wytworzenie filtra cząstek stałych do silnika SI DI stanowiącego potencjalny zamiennik dla filtra z nośnikiem ceramicznym. Dokonano także weryfikacji jego skuteczności podczas badań porównawczych.

W odniesieniu do postawionej tezy pracy sformułowano następujące wnioski:

1. Wszystkie konfiguracje spełniły wymagania normy Euro 6d w zakresie emisji PM_m i PN. Zastosowanie metalowego nośnika w konfiguracji GPF/TWC jako jedyne go elementu układu oczyszczania gazów wylotowych skutkowało wynikami zbliżonymi do wartości dopuszczalnych, dlatego zastosowano dodatkowy reaktor TWC (konfiguracja 4 i 5) w celu wspomaganie reakcji utleniania i redukcji przed filtrem GPF.
2. Wykorzystanie narzędzia do numerycznej mechaniki płynów umożliwiło wybór najskuteczniejszego wariantu geometrii perforacji kanałów filtrujących, którego

skuteczność zweryfikowano podczas badań na stanowisku silnikowym. Wybrany wariant cechował się sprawnością filtracji na poziomie 89%. Pomimo, że nie była to największa wartość, wpływ na wybór wariantu miały pozostałe parametry, takie jak: równomierny rozkład prędkości przepływu gazów wylotowych na wlocie do nośnika oraz wpływ stopniowej zmiany kąta nachylenia perforacji na efektywność wykorzystania przestrzeni kanałów filtrujących.

3. W odniesieniu do przyjętych kryteriów uzyskana emisja drogowa składników gazów wylotowych wykazała, że największą skuteczność ograniczania uzyskano dla konfiguracji 5 (tab. 10.1). Najmniej skutecznymi rozwiązaniami były konfiguracje 1 i 3, z których pierwsza miała najmniejsze działanie w ograniczeniu emisji THC, druga w odniesieniu do PN i PM_m. Tabela stanowi graficzną interpretację wyników dla poszczególnych konfiguracji. Wartości danych składników gazów wylotowych porównano i przydzielono określony kolor i symbol. Dla wartości najmniejszej zastosowano kolor zielony, a dla największej czerwony, dostosowując symbol do kolejności uzyskanych wyników.
4. Konfiguracje 4 i 5 nie przekroczyły wartości dopuszczalnych dla żadnego z toksycznych składników, dlatego prawdopodobne jest, że w przypadku silnika dostosowanego do spełnienia normy Euro 6d wartości byłyby kilkukrotnie mniejsze, co pozostawia odpowiedni margines niezbędny z uwagi na stałe zastrzeżenie przepisów.
5. Emisja CO₂ dla wszystkich konfiguracji charakteryzuje się jednakowym rzędem wielkości. Najmniejszą wartość uzyskano dla konfiguracji 2. Prawdopodobną przyczyną były najmniejsze opory przepływu gazów wylotowych przez nośnik ceramiczny. Zastosowanie dwóch elementów w układzie wylotowym nie wpłynęło na znaczne zwiększenie emisji CO₂, która wynika ze zużycia paliwa.
6. Opracowana metodyka badań umożliwia wykonanie badań porównawczych i weryfikacyjnych w warunkach laboratoryjnych, a tym samym obniżenie kosztów związanych z badaniami w warunkach rzeczywistych i koniecznością modyfikacji układu wylotowego w pojeździe. Powtarzalność cyklu badawczego umożliwia wybór najlepszego rozwiązania, które w wyniku dalszych prac może być zastosowane w rzeczywistym pojeździe.

Tabela 10.1. Wpływ konfiguracji na emisję toksycznych i szkodliwych składników gazów wylotowych

	Numer badanych konfiguracji				
	1 ¹⁾	2 ²⁾	3 ³⁾	4 ⁴⁾	5 ⁵⁾
CO ₂ [g/km]	↑	↓	↑↑	↑	↑
CO [g/km]	↑↑	↑	↑	↓	↓
NO _x [g/km]	↑	↑	↑	↓	↓
THC [g/km]	↑↑	↓	↑↑	↓	↓
C ₆ H ₁₄ [g/km]	↑↑	↑↑	↑	↓	↓
PM [mg/km]	↑	↓	↑	↑	↓
PN [# /km]	↑	↑	↑↑	↑	↓

¹⁾ Komercyjny TWC.

²⁾ Komercyjny GPF/TWC.

³⁾ Prototypowy GPF/TWC.

⁴⁾ TWC 400 CPSI + prototypowy GPF/TWC.

⁵⁾ TWC 200 CPSI + prototypowy GPF/TWC; zwiększenie emisji CO₂ o 5%.

Wnioski szczegółowe

Analiza wyników obliczeń numerycznych oraz badań laboratoryjnych umożliwiła sformułowanie wniosków szczegółowych:

1. W dysertacji opracowano autorski test w warunkach laboratoryjnych stanowiący odzwierciedlenie testu w warunkach rzeczywistych na dynamicznej hamowni silnikowej. Opracowany test posłużył do analizy porównawczej skuteczności filtracji poszczególnych konfiguracji.
2. Zwiększona skuteczność prototypowych konfiguracji 4 i 5 w porównaniu do konfiguracji 3 wynika z zastosowania dodatkowego reaktora TWC, który wspomaga utlenianie cząstek stałych w układzie wylotowym.
3. Zastosowanie reaktora TWC przed filtrem GPF w konfiguracji 5 spowodowało różnicę w skuteczności układu w następującym wymiarze (w odniesieniu do komercyjnego GPF/TWC w konfiguracji 2):
 - a) THC – zmniejszenie emisji o 43%,
 - b) CO – zmniejszenie emisji o 50 %,
 - c) NO_x – zmniejszenie emisji o 67%,
 - d) CO₂ – zwiększenie emisji o 5%,
 - e) PM_m – zwiększenie emisji o 3 %,
 - f) PN – zmniejszenie emisji o 35%.
4. Zastosowanie reaktora TWC z nośnikiem ceramicznym jako jedyne elementu układu oczyszczania gazów wylotowych jest niewystarczające w aspekcie spełnienia wymagań normy Euro 6d z uwagi na brak jednoczesnego działania na gazowe i stałe składniki gazów wylotowych.
5. Nie przekroczono wskaźnika CF_{PN} dla żadnej konfiguracji. Najmniejszą wartość uzyskano dla konfiguracji 5 (19% normy). Wskaźnik emisji CF_{NOx} przekroczono dla konfiguracji 1 (o 90%) i 3 (o 43%). Konfiguracja 2 osiągnęła wartość bliską dopuszczalnej (95% normy). Najskuteczniejszymi rozwiązaniami były konfiguracja 4 i 5 (32% normy).

11. Kierunki dalszych prac

Wyniki uzyskane na podstawie badań motywują do prowadzenia dalszych prac związanych z rozwojem filtrów cząstek stałych i ich dostosowaniem do silników zasilanych bezpośrednim wtryskiem benzyny również w zastosowaniu hybrydowych napędów alternatywnych. Pomimo wyczerpania zakresu rozprawy doktorskiej i udowodnienia postawionej tezy kierunkami dalszych prac mogą być:

1. Badania nad opracowaniem nośnika metalowego typu *wall-through*.
2. Analiza LCA i energochłonności procesu produkcji filtrów.
3. Weryfikacja działania prototypowego filtra w rzeczywistym warunkach ruchu.
4. Analiza zastosowania filtra w pojazdach o napędach hybrydowych.

Literatura

- [1] Abo-Qudais S., Abu-Qudais H., *Performance evaluation of vehicles emissions prediction models*, „Clean Technologies and Environmental Policy” 2005, Vol. 7(4), p. 279–284.
- [2] Adam F., Olfert J., Wong K., Kunert S., Richter J.M., *Effect of Engine-Out Soot Emissions and the Frequency of Regeneration on Gasoline Particulate Filter Efficiency*, „SAE Technical Paper” 2020, No. 2020-01-1431.
- [3] Akhtara F., Andersson L., Ogunwumi S., Hedin N., Bergström L., *Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders*, „Journal of the European Ceramic Society” 2014, Vol 34, p. 1643–1666.
- [4] Arunachalam H., Pozzato G., Hoffman M., Onori S., *Modeling the thermal and soot oxidation dynamics inside a ceria-coated gasoline particulate filter*, „Control Engineering Practice” 2020, Vol. 94.
- [5] Assal Z.E., Ojala S., Drif A., Zbair M., Bensitel M., et al., *Total oxidation of dichloromethane over silica modified alumina catalyst washcoated on ceramic monoliths*, „Catalysts” 2018, Vol. 8, No. 8, p. 339.
- [6] Awad O.I., Ma X., Kamil M., Ali O.M., Zhang Z., et al., *Particulate emissions from gasoline direct injection engines: A review of how current emission regulations are being met by automobile manufacturers*, „Science of the Total Environment” 2020, No. 20-718-137302.
- [7] Bajerlein M., Rymaniak Ł., Ziółkowski A., *Analiza emisji cząstek stałych autobusu miejskiego z szeregowym napędem hybrydowym*, „Logistyka” 2014, nr. 3, s. 178–185.
- [8] Baldauf R.W., Devlin R.B., Gehr P., Gianelli R., Hassett-Sipple B., et al., *Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop*, „International Journal of Environmental Research and Public Health” 2015, Vol. 13, No. 11.
- [9] Belot I., Vidal D., Greiner R., Votsmeier M., Hayes R.E., et al., *Impact of washcoat distribution on the catalytic performance of gasoline particulate filters as predicted by lattice Boltzmann simulations*, „Chemical Engineering Journal” 2021, Vol. 406.
- [10] Blair P., *Design and simulation of two stroke engines*, „SAE” 1996, ISBN,1-56091-685-0.
- [11] Blažek M., Žalud M., Kočí P., York A., Schlepütz C., et al., *Washcoating of catalytic particulate filters studied by time-resolved X-ray tomography*, „Chemical Engineering Journal” 2021, Vol. 409.
- [12] Boger T., Rose, D., Nicolin, P., Gunasekaran, N., and Glasson, T., *Oxidation of Soot (Printex U) in Particulate Filters Operated on Gasoline Engines*, „Emission Control Science Technology” 2015, Vol. 1, p. 49–63.
- [13] Chincholkara S.P., Suryawanshib J.G., *Gasoline Direct Injection: An Efficient Technology*, „Energy Procedia” 2016, Vol. 90, p. 666–672.
- [14] Choi S., Seong H., *Lube Oil-Independent Ash Chemistry on Soot Oxidation Reactivity in A Gasoline Direct Injection Engine*, „Combustion and Flame” 2016, Vol. 174, p. 68–76.
- [15] Choi S., Seong H., *Oxidation Characteristics of Gasoline Direct Injection (GD) engine soot: Catalytic Effects of Ash and Modified Kinetic Correlation*, „Combustion and Flame” 2015, Vol. 162, No. 6, p. 2371–2389.
- [16] Cowley A., *PGM market report*, materiały firmy Johnson Matthey, 2021.

- [17] DeBusk M.M., Storey J.M.E., Eibl M.A., Thomas J.F., Toops T.J., et al., *Nonuniform Oxidation Behavior of Loaded Gasoline Particulate Filters*, „Emission Control Science and Technology” 2020, Vol. 6, No. 11.
- [18] Delphi Powertrain Systems; IHS, 2015.
- [19] Dobrzański T., *Encyklopedia techniki: budowa maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1968, s. 56–57.
- [20] Drzewiecki P., *Urządzenie do odzysku platyny ze zużytych katalizatorów samochodowych przy wykorzystaniu pompy magneto-hydrodynamicznej*, Materiały Śląskiego Środowiskowego Studium Doktoranckiego 2013.
- [21] Durczak T., Sander P., Górski K., *Analiza systemów oczyszczania spalin i metod ich regeneracji*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2017, Vol. 18, No. 12.
- [22] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/53/WE z dnia 18 września 2000 r. w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji (Dz.U. L 269 z 21.10.2000, s. 34).
- [23] Dziubak T., *Problemy filtracji powietrza zasysanego do spalinowych silników pojazdów mechanicznych*, Biuletyn WAT nr 3, 2006.
- [24] Easter J., Bohac S., Hoard J., Boehman A., *Influence of ash-soot interactions on the reactivity of soot from a gasoline direct injection engine*, „Aerosol Science and Technology” 2020, Vol. 54, No. 64, p. 1–16.
- [25] Easter J., Fiano A., Bohac S., Premchand K. Hoard J., *Evaluation of Low Mileage GPF Filtration and Regeneration as Influenced by Soot Morphology, Reactivity and GPF Loading*, „SAE Technical Paper” 2019, No. 2019-01-0975.
- [26] Eastwood P., *Particulate emissions from vehicles*, „Wiley Professional Engineering Publishing Series” 2008.
- [27] Fang T., Wang L.: Wang Z., *Particulate Matter Emissions from Gasoline Direct Injection Engines: Research Review*, „Automotive Safety and Energy” 2017, Vol. 8 No. 3.
- [28] Fatouraie M., Frommherz M., Mosburger M., Chapman E., et al., *Investigation of the Impact of Fuel Properties on Particulate Number Emission of a Modern Gasoline Direct Injection Engine*, „SAE Technical Paper” 2018, No. 2018-01-0358.
- [29] Favre C., Demuyneck J., Bosteels D., *Emissions control technologies to meet current and future european vehicle emissions legislations*, „Association for Emissions Control by Catalyst” 2016.
- [30] Fikus F., Wieczorek T., *Urządzenia magneto-hydrodynamiczne w odlewniach i hutach*, Wydawnictwo Śląsk 1977.
- [31] Fontaras G., Ciuffo B., Zacharof N., Tsiakmakis S., Marotta A., et al., *The difference between reported and real-world CO2 emissions: How much improvement can be expected by WLTP introduction?*, „Transportation Research Procedia” 2017, Vol. 25, p. 3933–3943.
- [32] Fornalczyk A., Kraszewski M., Willner J., Kaduková J., Mrazikova A., et al., *Dissolution of metal supported spent auto catalyst in acids*, „Archives of Metallurgy and Materials” 2015, Vol. 61, No. 1, p. 233–236.
- [33] Fornalczyk A., Saternus M., Willner J., Fafiński M., Kania H. i in., *The results of platinum recovery from metal substrate catalytic converters by using magneto-hydro-dynamic pump*, 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials 2016.

- [34] Fornalczyk A., Saternus M., *Porównanie metod odzysku platyny ze zużytych katalizatorów samochodowych*, „Rudy i Metale Nieżelazne” 2011, R. 56, nr 5, s. 259–265.
- [35] Fornalczyk A., Saternus M., *Recykling zużytych katalizatorów samochodowych*, „Rudy i Metale Nieżelazne” 2007, nr 6, s. 326–332.
- [36] Fuć P., Lijewski P., Sokolnicka B., Siedlecki M., Szymlet N., *Analysis of exhaust gas flow through a particulate filter in the exhaust of the spark ignition direct injection*, „AIP Conference Proceedings” 2019, No. 2078.
- [37] Fuć P., Rymaniak Ł., Ziółkowski A., *The correlation of distribution of PM number emitted under actual conditions of operation by PC and HDV vehicles*, „Air Pollution” 2013, Vol. 174.
- [38] Fuć P., Siedlecki M., Szymlet N., Sokolnicka B., Rymaniak Ł., Dobrzyński M., *Emisja składników toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji z silnika pojazdu spełniającego normę homologacyjną EURO 6c*, „Journal of KONBiN” 2019, Vol. 49, Issue 4.
- [39] Fuć P., *Studium pasywnej regeneracji filtrów cząstek stałych w silnikach o zapłonie samoczynnym*, Rozprawa habilitacyjna, Poznań 2013.
- [40] Fuć P., *Wpływ składu i parametrów złoża katalitycznego modyfikowanego nanocząsteczkowym rutenem na emisję szkodliwych składników spalin z silnika o zapłonie samoczynnym*, Rozprawa doktorska, Poznań 2002.
- [41] Fuji M., Shiroki Y., Menchavez R.L., Takegami H., Takahashi M., et al., *Fabrication of cordierite filter by in-situ solidification for high temperature dust collection*, „Powder Technology” 2007, Vol. 172, Issue 1, p. 57-62.
- [42] Giakoumis E.G., Zachiotis A.T., *Investigation of a Diesel-Engined Vehicle's Performance and Emissions during the WLTC Driving Cycle—Comparison with the NEDC*, „Energies” 2017, Vol. 10, No. 2, p. 240.
- [43] Giakoumis E.G., *Driving and Engine Cycles*, Springer 2017.
- [44] Giechaskiel B., Vlachos T., Riccobono F., Forni F., Colombo R., et al., *Implementation of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) for the Real-driving Emissions (RDE) Regulation in Europe*, „Journal of Visualized Experiments” 2016, Vol. 118, No. 54753.
- [45] Giechaskiel, B., Lahde, T., Suarez-Bertoa, R., Clairotte M., Grigoratos T., et al., *Particle number measurements in the European legislation and future JRC activities*, „Combustion Engines” 2018, Vol. 174, No. 3, p. 3–16.
- [46] Hejny B., Olczyk, M., Bielaczyc, P., *Znaczenie emisji cząstek stałych z silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny*, „Logistyka” 2015, nr 3, s. 1771–1783.
- [47] Hensel C., Konieczny R., Brück R., *Recycling Technology for Metallic Substrates: a Closed Cycle*, Society of Automotive Engineers, Inc Demet Recycling AG 2010.
- [48] Hooftman N., Massagie M., Mierlo J.V., Coosemans T., *A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2018, Vol. 86, p. 1–21.
- [49] Jakubiak Sz., *Filtracja aerozoli nanocząstek za pomocą materiałów włókninowych: mechanizmy zatrzymywania i wyniki doświadczalne*, „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” 2018, nr 1 (95), s. 5–12.
- [50] Joardder M., Shazib Uddin Md., Murari Mohon R., *Effect of engine backpressure on the performance and emissions of a CI engine*, ICME 2011.

- [51] Johnson T., *Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration and Aging*, SAE 2007.
- [52] Karuppusamy P., Senthil R., *Design, analysis of flow characteristics of catalytic converter and effects of backpressure on engine performance*, IJREAT Conference 2013.
- [53] Kikuchi S., Hacho S., Okayama T., Inose S., Ikeshima K., *High Cell Density and Thin Wall Substrate for Higher Conversion Ratio Catalyst*, SAE Technical Paper 1999, No. 1999-01-0268.
- [54] Kim H.J., Choi M.G., Park M.K., Seo Y.R., *Predictive and Prognostic Biomarkers of Respiratory Diseases due to Particulate Matter Exposure*, „Journal of Cancer Prevention” 2017, Vol. 22, No. 1, p. 6–15.
- [55] Kittelson D., Kraft M., *Particle formation and model in internal combustion engines*, University of Cambridge 201, Preprint No. 142.
- [56] Kurien C., Strivastava A.K., Naudin J., *Modelling of regeneration and filtration mechanism in diesel particulate filter for development of composite regeneration emission control system*, „Archive of Mechanical Engineering” 2018, Vol. 65, No. 2, p. 277–290.
- [57] Kwon H., Ryu M., Carlsten C., *Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease*, „Experimental & molecular medicine” 2020, Vol. 52, No. 3, p. 318–328.
- [58] Lambert C., Chanko T., Dobson D., Liu X., Pakko J., *Gasoline Particle Filter Development*, „Emission Control Science and Technology” 2017, Issue 1, p. 105–111.
- [59] Legutko P., *Katalityczne usuwanie cząstek sadzy z powietrza jako środowiskowy przyczynnik do naturalnego obiegu węgla*, Zakład Chemii Środowiska Uniwersytetu Jagiellońskiego 2017.
- [60] Li L., Zhai L., Zhang X., Lu J., Chen R., Wu F., Amine K., *Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by ultrasonic-assisted leaching process*, „Journal of Power Sources” 2014, Vol. 262.
- [61] Liu J.-P., Fu J., Feng K., Wang S.-Q., Zhao Z.-C., *Characteristics of engine exhaust gas energy flow*, „Journal of Central South University (Science and Technology)” 2011, Vol. 42, No. 11.
- [62] Liu X., Sente J., Pakko J., Lambert C. Maricq M., *Using Artificial Ash to Improve GPF Performance at Zero Mileage*, SAE Technical Paper 2019, No. 2019-01-0974.
- [63] Łukasiewicz M., Kałaczyński T., Liss M., Wilczarska J., Sołtys K., *Ocena stanu filtrów cząstek stałych pojazdów osobowych*, „Logistyka” 2015, nr 4, s. 4577–4585.
- [64] Marsh, P., Acke, F., Konieczny, R., Brück, R., Hirth P., *Application Guideline to Define Catalyst Layout for Maximum Catalytic Efficiency*, SAE Technical Paper 2001, No. 2001-01-0929.
- [65] Merkisz J., Lijewski P., Fuć P., Rymaniak Ł., Ziółkowski A., *Measurement of exhaust emissions under actual operating conditions with the use of PEMS: review of selected vehicles*, „Improvement Trends for Internal Combustion Engines” 2018.
- [66] Molik P., *Analiza parametrów szybkozmiennych i ekologicznych doładowanego silnika o zapłonie iskrowym w warunkach statycznych i podczas rzeczywistej eksploatacji*, Rozprawa doktorska, Poznań 2017.

- [67] Murray A.J., *Recovery of Platinum Group Metals from Spent Furnace Linings and Used Automotive Catalysts*, rozprawa doktorska, Uniwersytet Birmingham 2011.
- [68] Myung C. L., Kim J., Jang W., Jin D., Park S., et al., *Nanoparticle filtration characteristics of advanced metal foam media for a spark ignition direct injection engine in steady engine operating conditions and vehicle test modes*, „Energies” 2015, Vol. 8, No. 3, p. 1865–1881.
- [69] Myung C. L., Park S., *Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: A review*, „International Journal of Automotive Technology” 2012, Vol. 13, No. 9.
- [70] Nakashimaa T., Basaki M., Saitob K., Furuno S., *New concept of a direct injection SI gasoline engine: a study of stratified charge combustion characteristics by radical luminescence measurement*, JSAE Review 2003, Vol. 24, p. 17–23.
- [71] Nohira H., *Development of Toyota's direct injection gasoline engine*. Proceedings of AVL Engine and Environment Conference 1997, p.239–49.
- [72] Ohara E., Mizuno Y., Miyairi Y., Mizutani T., Yuuki K., et al., *Filtration Behavior of Diesel Particulate Filters*, SAE Technical Paper 2007, No. 2007–01–0921.
- [73] Ohlwein S., Kappeler R., Joss M.K., Künzli N., Hoffmann B., *Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence*, „International Journal of Public Health” 2019, Vol. 4, p. 547–559.
- [74] Olczyk M., Hejny B., Bielaczyc P., *An overview of particle number emission from direct injection SI engine in scope of new legislation rules*, „Combustion Engines” 2015, Vol. 163, No. 4, p. 67–78.
- [75] Park C., Kim S., Kim H., Moriyoshi Y., *Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine*, „Energy” 2012, Vol. 41, p. 401–407.
- [76] Pavlovica J., Ciuffoa B., Fontarasa G., Valverdea V., Marottab A., *How much difference in type-approval CO2 emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)?*, „Transportation Research Part A: Policy and Practice” 2018, Vol. 111, p. 136–147.
- [77] Piock W., Hoffmann G., Berndorfer A., Salemi P., Fusshoeler B., *Strategies towards meeting future particulate matter emissions requirements in homogeneous GDI engines*, SAE Technical Paper 2011, No. 2011–01–1212.
- [78] Podgórski A., *Protection of the respiratory system against nanoparticles inhalation*, „Nanoparticles in medicine and environment” 2010, p. 251–277.
- [79] Raza M., Chen L., Leach F., Ding S., *A Review of Particulate Number (PN) Emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Engines and Their Control Techniques*, „Energies” 2018, Vol. 11, No. 6, p. 14-17.
- [80] *Real Driving Emissions* (<https://www.aecc.eu/key-topics/real-driving-emissions/>, dostęp elektroniczny z dnia 26.10.2020), Asociacion of Emission Control by Catalyst 2020.
- [81] *Real-Driving Emissions test procedure for exhaust gas pollutant emissions of cars and light commercial vehicles in Europe*, The international Council of Clean Transportation 2017.
- [82] Rotondi R., Bella G., *Gasoline direct injection spray simulation*, „International Journal of Thermal Science” 2006, Vol. 45, p. 168–179.

- [83] Rottenkolber G., Gindele J., Raposo J., Dullenkopf K., Hentschel W., Spicher U., *Spray analysis of a gasoline direct injector by means of two-phase PIV*, „Experiments in Fluids” 2002, Vol. 32, p. 710–721.
- [84] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2020/239 z dnia 20 lutego 2020r.
- [85] Schroder A., Kupnik M., O'Leary P., Benes E., Groschl M., *A capacitance ultrasonic transducer with micromachined backplate for fast flow measurements in hot pulsating gases*, „IEEE Sensors Journal” 2004, Vol. 6, Issue 4.
- [86] Serrano J.R., Novella R., Piqueras P., *Why the Development of Internal Combustion Engines Is Still Necessary to Fight against Global Climate Change from the Perspective of Transportation*, „Applied Science” 2019, Vol. 9, No. 21, p. 45–97.
- [87] Shao H., Remias J.E., Roos J.W., *Testing Tomorrow: Gasoline Particulate Filter and Emerging Technology*, Afton Chemical Corporation 2019.
- [88] Siedlecki M., Fuć P., Sokolnicka B., Szymlet N., *Analiza wpływu konfiguracji pozasilnikowych układów oczyszczania spalin w aspekcie temperatury w układzie wylotowym silnika o zapłonie iskrowym*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2019, r. 20, nr 6, s. 263–267.
- [89] Siedlecki M., Szymlet N., Sokolnicka-Popis B., *Influence of the particulate filter use in the spark ignition engine vehicle on the exhaust emission in real driving emission test*, „Journal of Ecological Engineering” 2020, Vol. 21, No. 1, p. 120–127.
- [90] Sobianowska-Turek A., *Odzysk cynku i manganu z baterii Zn-C i Zn-Mn*, Rozprawa doktorska 2009.
- [91] Sokolnicka B., Fuć P., Szymlet N., Siedlecki M., *Analiza wyników symulacji różnych konfiguracji filtrów cząstek stałych w układzie wylotowym silnika o zapłonie iskrowym*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2019, r. 20, nr 6, s. 268–273.
- [92] Stępień Z., *Systemy filtracji spalin do samochodowych silników z zapłonem samoczynnym – problemy regeneracji filtrów DPF*, „Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu” 2016, nr 207.
- [93] Trębacz H., Michno P., *The evaluation of platinum group metals (PGMs) and their recovery from car catalytic converters*, „Structure and Environment” 2017, Vol. 31, No. 6.
- [94] Van Nieuwstadt M., Shah A., Serban E., Martin, D., *Regeneration Strategies for Gasoline Particulate Filters*, SAE Technical Paper 2019, No. 2019–01–0969.
- [95] Wang J., Wang Z., *Research progress of high efficient and clean combustion of automotive gasoline engines*, „Journal Of Automotive Safety And Energy” 2010, Vol. 1, No. 3, p. 167–178.
- [96] Wang J., Yan F., Fang N., Yan D., Zhang G., et al., *An Experimental Investigation of the Impact of Washcoat Composition on Gasoline Particulate Filter (GPF) Performance*, „Energies” 2020, Vol. 13, No. 3, p. 693.
- [97] *Worldwide Emissions Standards, Passenger cars and light duty vehicles*, Delphi Technologies 2019/2020.
- [98] Wójcik M., Pawłowska B., Stachowicz F., *Recycling of automotive catalytic converters with application of magneto-hydrodynamic pump*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 2016, z. 88 [293], nr 1, s. 73–83.

- [99] Wójcik M., *Technologie recyklingu filtrów cząstek stałych (DPF) z wyeksploatowanych autobusów z silnikiem wysokoprężnym*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2017, r. 18, nr 10, s. 29–33.
- [100] Xun D., Hao H., Sun X., Liu Z., Zhao F., *End-of-life recycling rates of platinum group metals in the automotive industry: Insight into regional disparities*, „Journal of Cleaner Production” 2020, Vol. 266, No. 12194.
- [101] Yakoumis I., Moschovi A.M., Giannopoulou I., Pantias D., *Real life experimental determination of platinum group metals content in automotive catalytic converters*, „IOP Conference Series Materials Science and Engineering” 2018, Vol. 329, No. 1.
- [102] Yang J., Stewart M., Maupin G., Herling D., Zelenyuk A., *Single wall diesel particulate filter (DPF) filtration efficiency studies using laboratory generated particles*, „Chemical Engineering Science” 2009, Vol. 64, Issue 8, p. 1625–1634.
- [103] Yin P., Guo J., Wang L., Fan W., Lu F., *Higher Risk of Cardiovascular Disease Associated with Smaller Size-Fractioned Particulate Matter*, „Environmental Science & Technology Letters” 2020, Vol. 7, No. 2, p. 95–101.
- [104] Zhao F., Harrington D., Lai M., *Automotive gasoline direct injection engines*, SAE International 2002.
- [105] Zhao F., Lai M. C., Harrington D. L., *Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines*, „Progress in Energy and Combustion Science” 1999, Vol. 25, p. 437–562.
- [106] Zinola S., Leblanc M., Boreave A., R'Mili B., Cartoixa B., et al., *The Particulate Number Emissions from GDI Engines: Advanced Characterization and Reduction through a Gasoline Particulate Filter with Membrane Technology*, SIA International Conference: The spark Ignition Engine of the Future 2013.
- [107] Żmudka Z., Postrzednik S., *Opór przepływu w układzie dolotowym jako element regulacji obciążenia silnika spalinowego*, „Czasopismo Techniczne”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2008.
- [108] <https://9thgencivic.com> (dostęp elektroniczny z dnia 15.02.2021).
- [109] <https://aecc.eu> (dostęp elektroniczny z dnia 30.11.2020).
- [110] <https://automex.eu> (dostęp elektroniczny z dnia 01.02.2021).
- [111] <https://avl.com> (dostęp elektroniczny z dnia 01.02.2021).
- [112] <https://bosch-mobility-solutions.com> (dostęp elektroniczny z dnia 17.12.2020).
- [113] <https://bp.com> (dostęp elektroniczny z dnia 16.09.2020).
- [114] <https://dieselnet.com/> (dostęp elektroniczny z dnia 09.12.2020).
- [115] <https://dpf-lab.pl> (dostęp elektroniczny z dnia 26.11.2020).
- [116] <https://elemental.biz> (dostęp elektroniczny z dnia 01.02.2021).
- [117] <https://epicsensors.com> (dostęp elektroniczny z dnia 25.01.2021).
- [118] <https://gpsvisualizer.com> (dostęp elektroniczny z dnia 05.05.2018).
- [119] <https://ngva.eu> (dostęp elektroniczny z dnia 24.11.2020).
- [120] <https://otomatic.co.uk> (dostęp elektroniczny z dnia 26.11.2020).

- [121] <https://pmr.unicore.com> (dostęp elektroniczny z dnia 31.01.2021).
- [122] <https://sensors-inc.com> (dostęp elektroniczny z dnia 19.01.2021).
- [123] <https://specialtymetals.com> (dostęp elektroniczny z dnia 19.01.2021).
- [124] <https://tradingeconomics.com> (dostęp elektroniczny z dnia 07.04.2021).
- [125] <https://tsi.com> (dostęp elektroniczny z dnia 20.01.2021).
- [126] <https://vert-certification.eu> (dostęp elektroniczny z dnia 02.02.2021).
- [127] <https://wearebg.com> (dostęp elektroniczny z dnia 21.09.2020).
- [128] <https://www.wltpfacts.eu> (dostęp elektroniczny z dnia 12.12.2020).

Abstract

Analysis of the particulate emissions reduction from direct injection spark ignition engines by means of a filtration technology

The increased emission of nanoparticles into the atmosphere is one of the main concerns of legislative bodies responsible for reducing harmful and toxic substances emissions from automotive sources. According to the forecast for 2025, internal combustion engines powered by conventional fuels will constitute 85% of propulsion sources. The increased popularity of gasoline direct injection engines in recent years has resulted in a sharp increase in the content of particulate matter with diameters below 100 nm in exhaust gas. A particular threat to human health is the emission of nanoparticles in urban areas, where the probability of exposure to direct contact with the human respiratory system is the highest. Research carried out by research centers around the world confirms the carcinogenic effect and the negative effect of particulate matters on the human circulatory and respiratory systems. The increasing environmental awareness of vehicle users and manufacturers requires the application of solutions limiting the emission of particulate matters (PM) to the atmosphere in terms of both mass and number of particles. This is directly related to the goal of the doctoral dissertation, which is to design and manufacture a particulate filter with a metal substrate that can be a substitute for filters with a ceramic substrate.

The introduction demonstrates the legitimacy of conducting research on the development of exhaust gas cleaning systems due to the prediction of dominance in the global market for passenger vehicles with internal combustion engines, including mainly SI DI engines (spark ignition with direct fuel injection). Despite the continuous development of electromobility, the phenomenon of energy loss in the process of its production and the insufficient share of renewable energy constitute an argument confirming the need to improve conventional drives. By 2025, gasoline direct injection engines will account for 40% of the global passenger vehicle market. The popularity of the unit is due to the increased compression ratio and reduced fuel consumption, which is one of the main selection criteria from the consumer's point of view.

The part of the thesis on PM emissions from SI DI engines describes the mechanisms of particle formation, the applicable regulations limiting the content of individual components in exhaust gases, as well as research methods and approval tests. Then, the characteristics of particulate filters were made with regard to their structure and principle of operation, the material from which the substrates were made and the methods of filter regeneration. The next step was to compare the conditions and operating parameters of individual types of filters and to characterize PM oxidation processes.

Based on the analysis of the current state of advancement of the utilization and recycling processes of ceramic and metal substrates, methods and efficiency of precious metals recovery from worn particulate filters and catalytic reactors have been presented.

The chapter on test methodology describes the procedure used in real conditions, passenger vehicles used to record the parameters to reproduce the test cycle with

a dynamic brake stand equipped with an engine with the same technical parameters. Then, the characteristics of the measuring equipment were made with the specification of the analyzers used to determine the mass and number of PM.

On the basis of numerical calculations made in the ANSYS program for three variants of metal substrates, an analysis of the influence of the use of perforation in the walls of filtration channels was performed. The analysis covers the velocity of the exhaust gas flow, dynamic, absolute and total pressure, the distribution of turbulence kinetic energy and the concentration of solid particles on the filter surface. Based on the results of the simulations, the most effective variant was indicated.

In the chapter on comparative and verification tests, the results obtained for two OEM (Original Equipment Manufacturer) filters and prototype metal substrates created as a result of the doctoral dissertation were analyzed. The comparison of the obtained values made it possible to indicate the most effective solution and to prove the thesis resulting from the goal of the doctoral dissertation.