

**POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA W KIELCACH**

**Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn**

**Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu**

**Zakład Silników Ciepłych**

**Laboratorium Silników Ciepłych**

**Laboratorium z przedmiotu**

**OCHRONA ŚRODOWISKA W TRANSPORCIE**

**Instrukcja do ćwiczenia**

**Pomiary zawartości w spalinach cząstek  
stałych za pomocą analizatora MEXA  
1230PM i przegląd metod ich ograniczania**

Opracował:  
Dariusz Kurczyński

Kielce 2014

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z pojęciem cząstek stałych PM, metodami pomiaru emisji cząstek stałych z tłokowych silników spalinowych oraz metodami ograniczania ich emisji.

## 2. Wprowadzenie

Ograniczanie emisji szkodliwych składników spalin z tłokowych silników spalinowych może odbywać na drodze:

- ograniczania powstawania związków szkodliwych w procesie spalania,
- neutralizacji toksycznych składników spalin w układzie wylotowym,
- zastosowania paliw alternatywnych o mniejszej lub zerowej toksyczności.

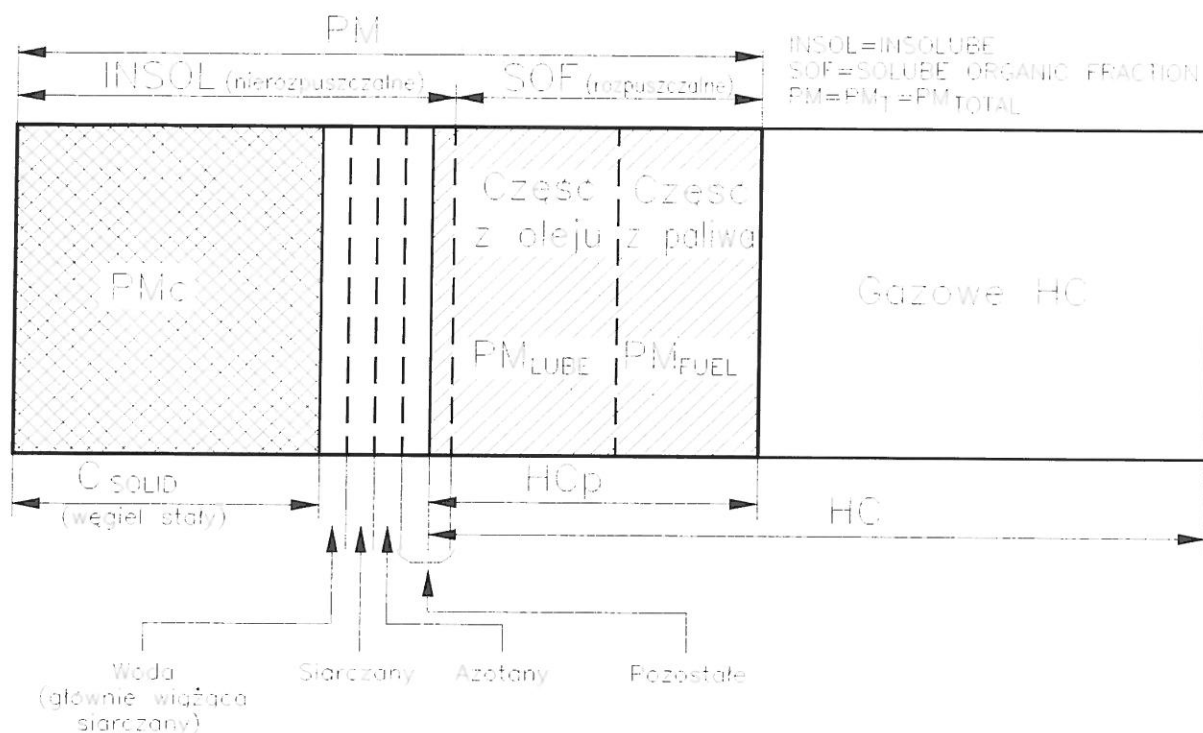
Obniżanie poziomu emisji szkodliwych składników spalin powinno być ukierunkowane głównie na ograniczenie przyczyn ich powstawania w samym silniku a dopiero później na ewentualnym ich usuwaniu ze spalin, czyli ograniczaniu skutków nieprawidłowego spalania [9]. Działania konstruktorów współczesnych silników muszą być ukierunkowane na doskonalenie procesu spalania. Powinno się to odbywać na drodze optymalizacji konstrukcji, stosowania dodatkowych systemów (np recyrkulacji spalin), rozwoju układów zasilania, układów doprowadzania i odprowadzania czynnika roboczego, układów zapłonowych, sterowania i kontroli przebiegu procesów w cylindrze silnika ze szczególnym zwróceniem uwagi na sterowanie procesem spalania [16]. Działania te są ograniczone ze względu na podstawowe zadanie silnika spalinowego jakim jest efektywne i sprawne wytwarzanie energii mechanicznej. Z tego powodu konieczne jest stosowanie reaktorów katalitycznych oraz innych systemów oczyszczających. Konieczne jest również poszukiwanie nowych paliw, które mogłyby przynajmniej częściowo a w przyszłości całkowicie zastąpić paliwa węglowodorowe. Dla spełnienia przyszłościowych norm konieczne będzie stosowanie jednocześnie wszystkich sposobów ograniczania szkodliwego wpływu samochodów na organizmy żywe i środowisko.

## 3. Cząstki stałe

Cząstki stałe emitowane ze spalinami tłokowych silników spalinowych stanowią system polidispersyjny składający się z cząstek o różnych wymiarach, kształcie i postaci występowania [3]. Powstają na skutek skomplikowanych procesów chemicznych i fizycznych zachodzących w różnych miejscach i czasie [6]. Ze względu na swoją złożoność i niejednorodność nie zostały one jednoznacznie zdefiniowane pod względem fizycznym ani chemicznym. Stanowią sumę substancji stałych i ciekłych, które zbierane zostają na specjalnym filtrze [4]. W pomiarach silnikowych przyjęte zostało pojęcie zgodnie z którym przez cząstki stałe rozumie się całą stałą lub ciekłą materię organiczną lub nieorganiczną, zgromadzoną na filtrze absolutnym po przejściu przez niego strumienia spalin rozcieńczonych powietrzem w temperaturze ok. 52°C [2]. Cząstki stałe stanowią niejednorodną i nieregularną mieszaninę składników chemicznych. Wyróżnia się w nich dwie zasadnicze frakcje:

- organiczną frakcję rozpuszczalną  $PM_{SOF}$ ,
- frakcję nierozpuszczalną  $PM_{INSOL}$ .

Poglądowy schemat budowy cząstki stałej przedstawiono na rysunku 1.

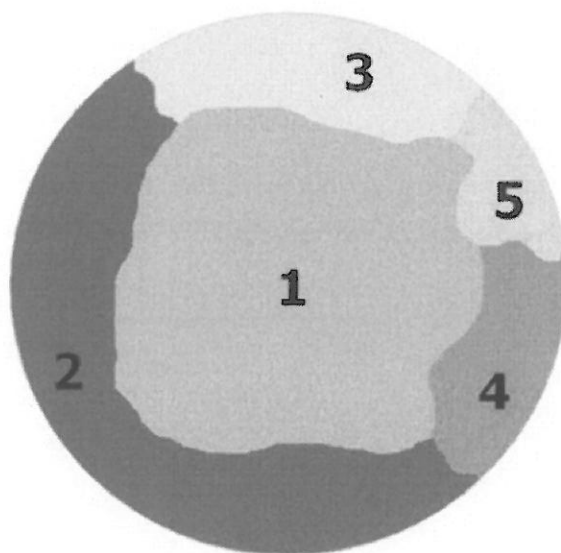


Rys. 1. Schemat budowy cząstki stałej [10]

W skład frakcji rozpuszczalnej  $PM_{SOF}$  wchodzi głównie węglowodory pochodzące z niespalonego paliwa i oleju smarującego oraz produkty niecałkowitego spalania. W skład SOF wchodzi wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i ich pochodne (octany, aldehydy), węglowodory alifatyczne, tlen, azot i siarka. Organiczna frakcja rozpuszczalna stanowi od kilku do kilkudziesięciu procent masy całkowitej emisji cząstek stałych. Jej ilość i skład zależy od temperatury spalin, stanu pracy silnika, rodzaju paliwa itp. [11]. Składa się, z niespalonych węglowodorów pochodzących z zbyt ubogiej lub zbyt bogatej mieszanki paliwowo-powietrznej, uderzenia strugi paliwa o ścianki komory spalania lub porywania kropel paliwa z kolektorów dolotowych, wygaszania płomienia w okolicy ścianek, obniżania temperatury ładunku w czasie procesu rozprężania. Frakcja nierozpuszczalna zawiera głównie węgiel w postaci sadzy. Poza tym zawiera również związki siarki, azotany, metale oraz wodę związaną z siarczanami. Metale znajdujące się w cząstkach stałych pochodzą z produktów ścierania elementów silnika, zanieczyszczeń paliwa, oleju smarnego oraz dodatków do paliwa.

Główną część cząstek stałych stanowi sadza, która jako czysty węgiel nie jest toksyczna (rys. 2). Szkodliwe są związki absorbowane przez sadzę, do których należą głównie wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne szczególnie niebezpieczne dla organizmu człowieka, węglowodory z niespalonego paliwa i oleju smarującego, oraz związki siarki, azotu i metale ciężkie. Tworzenie i utlenianie sadzy jest zasadniczym problem w rozwoju silników spalinowych o zapłonie samoczynnym [3]. Oceniając szkodliwe oddziaływanie cząstek stałych na organizmy żywe należy zwrócić szczególną uwagę na ich rozmiary [19]. Najbardziej szkodliwe są cząstki o wymiarach poniżej 50 nm, czyli nanocząstki. Ich udział w całkowitej liczbie cząstek stałych jest największy i wynosi ponad 90%. Masa emitowanych nanocząstek nie przekracza 20% całkowitej masy emitowanych cząstek stałych przez silnik. Ze względu na małe wymiary utrzymują się długo w atmosferze i łatwo wchłaniane są przez układ oddechowy. Wnikają głęboko w tkanki układu oddechowego i są praktycznie nie usuwalne. Umożliwiają wprowadzenie do organizmu różnych węglowodorów, metali ciężkich, związków siar-

ki. W efekcie swojego działania powodują stany zapalne, nieżyty i dolegliwości astmatyczne i rakotwórcze zmiany w tkankach płuc.



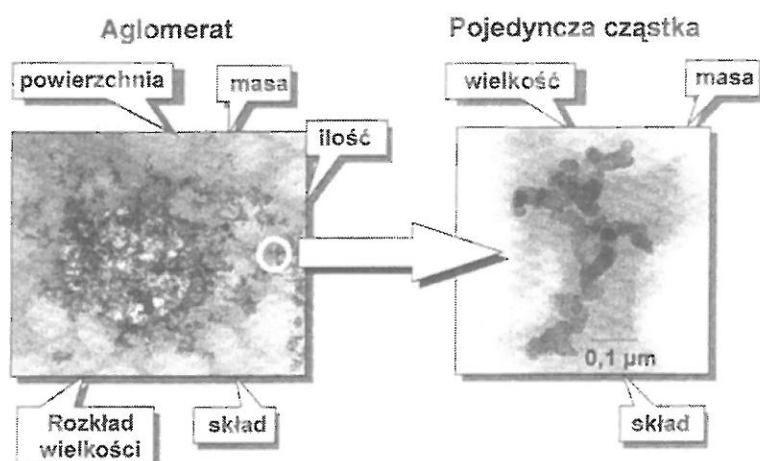
Rys. 2. Cząstka stała: 1 - węgiel, 2 - węglowodory, 3 - siarczany, 4 - tlenki metali, 5 - woda

Spaliny silnika Diesla są przyczyną ostrych jak i przewlekłych szkodliwych zmian w układzie oddechowych oraz w układzie sercowo-naczyniowym [17]. Są czynnikiem mutagennym i rakotwórczym. Łatwo są wchłaniane do organizmu poprzez drogi oddechowe i gromadzą się w pęcherzykach płucnych. Na toksyczność cząstek ma wpływ ich skład chemiczny, reaktywność zaadsorbowanych substancji chemicznych, stopień dyspersji a zwłaszcza ich wielkość. Mały wymiar cząstek umożliwia ich wnikanie głęboko do płuc, gdzie są deponowane a następnie mogą przenikać do krwi i układu nerwowego. Powodują zaburzenia metabolizmu tlenowego w komórkach, prowadząc do tworzenia wolnych rodników tlenowych i powstawania tzw. stresu oksydacyjnego w komórce. Stres oksydacyjny i reakcje zapalne to wyraz uszkodzenia komórki, którego następstwem może być destrukcja DNA prowadząca do mutacji komórki, a w efekcie do jej transformacji nowotworowej. Toksyczne oddziaływanie cząstek stałych jest efektem oddziaływania cząstek o wymiarach poniżej  $10\mu\text{m}$ . Cząstki stałe o wymiarach poniżej  $2,5\mu\text{m}$  kojarzone są z nieodwracalnymi zmianami w drogach oddechowych, cząstki o średnicy poniżej  $0,2\mu\text{m}$  powodują stres oksydacyjny i reakcje zapalne. Cząstki o wymiarach nano mogą swobodnie przenikać przez błony komórek i migrować do różnych narządów, ulegać w nich depozycji i wywoływać szkodliwe skutki zdrowotne. Liczba cząstek ultradrobnych może decydować o toksyczności spalin silnika o zapłonie samoczynnym. Zmiany technologii produkcji silników spalinowych ograniczają emisję spalin, ale nie ograniczają liczby cząstek najmniejszych w spalin, a wręcz przeciwnie powodują wzrost ich udziału.

Emisja cząstek stałych jest głównie problemem dla silników o zapłonie samoczynnym. Przy zastosowaniu współczesnych rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w silnikach można ograniczyć masę emitowanych cząstek prawie o 90%. Nie pozwalają one jednak na wydajne zmniejszenie emisji nanocząstek [19].

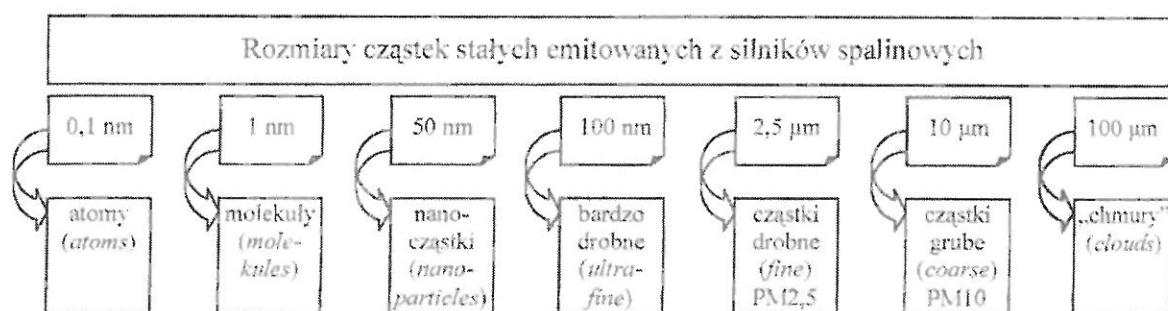
Emisja cząstek stałych z silników jest związana głównie z powstawaniem sadzy, z obecnością w spalinach produktów niecałkowitego i niezupełnego spalania, związkami siarki, azotu i cząstek metali. W silnikach o zapłonie iskrowym emisja cząstek stałych jest niewielka. Wynika to w dużej mierze z małej skłonności paliw benzynowych do tworzenia sadzy. Emisja cząstek stałych dla silników ZI jest związana z zawartością w spalinach związków siarki, ołowiu i związków organicznych [8]. Część węglowodorowa cząstek stałych emi-

towanych przez silniki ZI pochodzi ze zużytego oleju silnikowego i w minimalnej ilości jest wynikiem niecałkowitego spalania. Emisja cząstek stałych jest głównie problemem silników ZS i jest związana z obecnością sady w spalinach. Na wielkość emisji cząstek stałych ma wpływ między innymi zawartość siarki w paliwie, wartość liczby cetanowej oraz gęstość paliwa. Zapoczątkowanie powstawania sadzy następuje na skutek mieszania się chłodnego paliwa z gorącym powietrzem w cylindrze. Procesy zachodzące wówczas w cylindrze prowadzą do rozpadu i odwodornienia węglowodorów. W wysokiej temperaturze panującej w cylindrze następuje piroliza (rozpad cieplny) cząstek paliwa węglowodorowego. Powstają wówczas węglowodory nienasycone, pozbawione w dużym stopniu wodoru. Ulegają one następnie procesom polimeryzacji i cyklizacji, w wyniku których tworzy się cząstka sadzy. Powstające cząstki sadzy zlepiają się w skutek zderzeń. Im większe powstaną cząstki sadzy tym trudniej ulegają wypaleniu [7]. O chwilowej i miejscowej wartości stężenia cząstek sadzy w płomieniu silnika ZS decyduje intensywność przebiegających równolegle procesów powstawania sadzy i jej wypalania [11]. Cząstki sadzy adsorbują węglowodory z paliwa i oleju smarującego, związki siarki i azotu oraz metale. Pojedyncze cząstki łączą się w aglomeraty, które można scharakteryzować przez: masę, powierzchnię całkowitą, rozkład widmowy, a także skład chemiczny. Wielkości charakteryzujące cząstki stałe zostały wymienione na rysunku 3.



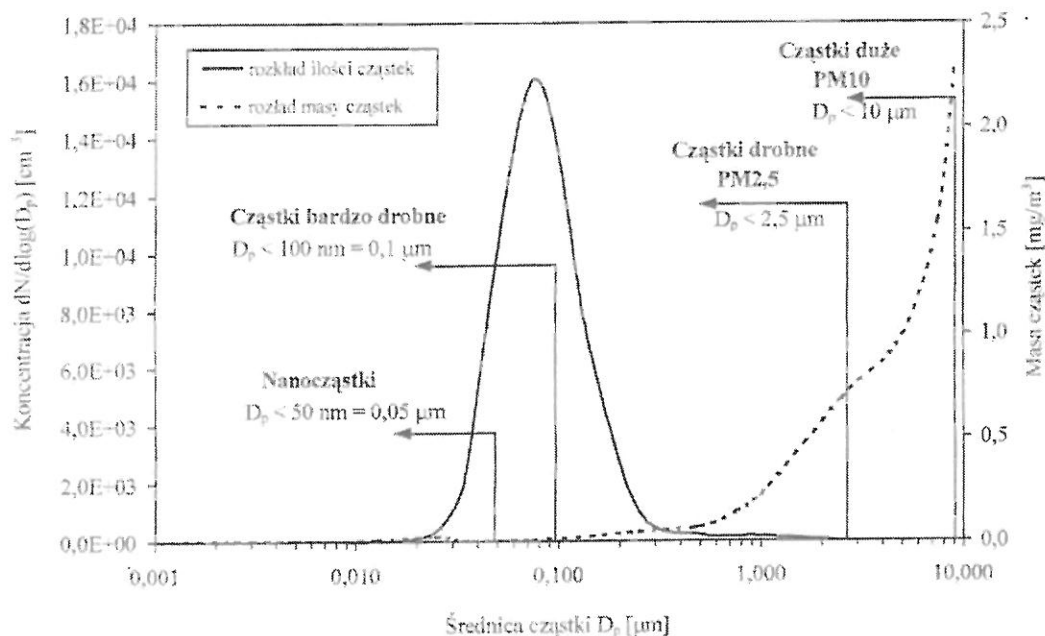
Rys. 3. Wielkości charakteryzujące cząstki stałe [2]

Jedną z najważniejszych właściwości cząstek stałych jest ich rozmiar. Na rysunku 4 przedstawiono klasyfikację cząstek stałych ze względu na rozmiar. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład ilości cząstek stałych oraz rozkład masy cząstek stałych. Ponad 90% całkowitej liczby cząstek znajdujących się w spalinach silników o zapłonie samoczynnym stałych stanowią nanocząstki. Ich masa stanowi tylko 10 ÷ 20% całkowitej masy cząstek emitowanych z silników ze spalinami.



Rys. 4. Klasyfikacja wymiarów cząstek stałych [2]





Rys. 5. Rozkład ilości i rozkład masy cząstek stałych emitowanych ze spalinami silników o zapłonie samoczynnym [2]

Cząstki stałe pochodzące z silnika o zapłonie samoczynnym są na tyle małe, że swobodnie mogą penetrować układ oddechowy ludzi i zwierząt i osadzać się w okolicach płuc. Frakcja określona jako PM-10, gdyż jej cząsteczki nie przekraczają dziesięciu mikronów, co pozwala im na swobodną inwazję w głąb układu oddechowego człowieka. Badania wykazały, że ryzyko zachorowań na raka układu oddechowego rośnie z 20 do około 50%, u osób pracujących w otoczeniu, w którym mają one do czynienia z ciągłą emisją spalin pochodzących z silnika ZS. Problem ten nie dotyczy tylko osób pracujących w kontakcie ze spalinami, ale dotyczy on dużej części populacji ludzkiej. Cząstki stałe prócz raka układu oddechowego mogą również powodować raka pęcherza moczowego. Wykryto również mutagenne składniki w cząstkach stałych emitowanych z silników o zapłonie samoczynnym.

#### 4. Metody pomiaru emisji cząstek stałych

Analizatory cząstek stałych stanowią oddzielną grupę urządzeń pomiarowych wykorzystywanych do badania składu spalin. Badania emisji cząstek stałych polegają na określaniu ich cech fizycznych: masy, rozkładu wymiarowego i kształtu. W badaniach homologacyjnych pomiary dotyczą przede wszystkim masy cząstek stałych. Analiza cząstek stałych wykonywana jest głównie dla silników o zapłonie samoczynnym, gdyż dla tego typu silników ich emisja jest zdecydowanie większa niż dla silników o zapłonie wymuszonym. Podczas analizy cząstek stałych do celów homologacyjnych spaliny rozciągane są powietrzem o temperaturze  $20 \pm 30^\circ\text{C}$  w specjalnych tunelach rozciągających. W czasie pomiarów woda nie może ulegać wykropleniu, a pomiar cząstek stałych musi odbywać się w temperaturze  $52^\circ\text{C}$  [11].

Do określania masy cząstek stałych wykorzystuje się analizatory działające w oparciu o różne metody jej pomiaru. Masa cząstek stałych emitowanych przez silniki spalinowe może być określana przy zastosowaniu następujących metod [3, 11, 13]:

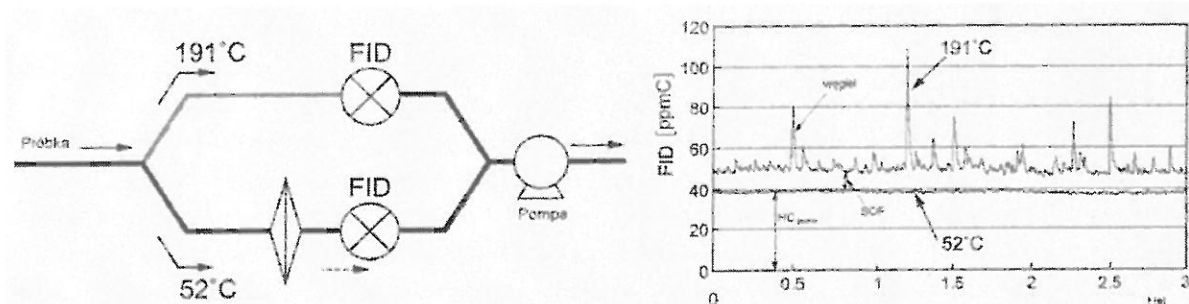
- **metody grawimetrycznej** polegającej na dokładnym warzeniu pobranej próbki cząstek wraz z elementem filtracyjnym. Pomiaru dokonuje się w ściśle określonej temperaturze i wilgotności względnej powietrza. Metoda ta uważana jest za najdokładniejszą i jest jedyną metodą określania masy cząstek stałych w badaniach homologacyjnych,

- **metody optycznej** w której mierzy się stopień pochłaniania światła przechodzącego przez strumień spalin. Masę cząstek stałych określa się wykorzystując zależności empiryczne. Metoda ta charakteryzuje się małą dokładnością,
- **metody fotoakustycznej** – wykorzystującej zjawisko absorpcji energii wiązki światła przez cząstki stałe o amplitudzie modulowanej w zakresie fal radiowych. Dokładność tej metody, podobnie jak optycznej, zależy od własności optycznych składników badanych spalin. Zaletą tej metody jest duża czułość, znacznie większa niż metody optycznej,
- **metody częstotliwościowe** polegające na pomiarze zmiany częstości drgań własnych elementu pomiarowego wraz ze zmianą masy cząstek stałych osadzających się na tym elemencie. Metoda ma mniejszą dokładność niż metoda grawimetryczna,
- **metody utleniania** – polegającej na zastosowaniu filtra kwarcowego zbierającego cząstki stałe bezpośrednio z układu wylotowego. Następnie w wysokiej temperaturze i przy dostarczeniu tlenu, cząstki stałe ulegają utlenieniu. Powstający dwutlenek węgla jest mierzony w detektorze. Jego stężenie jest proporcjonalne do masy cząstek stałych,
- **metody płomieniowo-jonizacyjnej** – polegającej na pomiarze prądu jonizacji płomienia na skutek spalania gazów wylotowych w płomieniu wodorowym (rys. 6). W metodzie tej spaliny kierowane są do dwóch analizatorów FID. W jednej drodze pomiarowej o temperaturze 191°C następuje pomiar całkowitej zawartości węglowodorów i węglowej części cząstek stałych. W drugiej drodze pomiarowej o temperaturze 52°C umieszczony jest filtr zatrzymujący cząstki stałe. Mierzone są w niej tylko węglowodory gazowe. Różnica zmierzonych sygnałów w poszczególnych analizatorach FID jest proporcjonalna do zawartości w spalinach frakcji organicznej cząstek stałych,
- **metody różnicowe** – polegające na pomiarze różnicy stężenia dwutlenku węgla uzyskiwanego ze spalania cząstek stałych zawartych w spalinach przepuszczanych przez dwie oddzielne komory spalania. Jedna droga pomiarowa wyposażona jest w filtr zatrzymujący cząstki stałe. W drugiej drodze pomiarowej przepływające ze spalinami cząstki stałe dostają się do komory spalania i tam ulegają utlenieniu, w wyniku czego powstaje dwutlenek węgla, dwutlenek siarki i para wodna. Następnie związki te są analizowane i możliwy jest pomiar ich składu i masy,
- **metody filtra kwarcowego** – polegającej na pomiarze masy cząstek stałych przy wykorzystaniu filtra kwarcowego. Cząstki stałe osadzają się na filtrze. Następnie za pomocą wiązki lasera cząstki znajdujące się na filtrze ulegają wypaleniu. Powstałe w wyniku spalania związki są mierzone w odpowiednich detektorach,
- **metody wysokotemperaturowego utleniania i redukcji** – polegającej na pomiarze związków powstałych z utleniania węgla, węglowodorów i siarki. Najpierw spaliny przepuszczane są przez filtr kwarcowy na którym osadzają się cząstki stałe. Następnie filtr ten umieszczany jest w komorze o temperaturze 980°C wypełnionej azotem. Zachodzi odparowanie frakcji organicznej SOF i termiczny rozkład siarczanów. Do środkowej części komory dostarczany jest tlen i frakcja organiczna utleniana jest w niej do CO<sub>2</sub>, a związki siarki do SO<sub>2</sub>. Po odparowaniu związków wchodzących w skład cząstek stałych azot jest zastąpiony tlenem i następuje utlenianie części węglowej cząstek stałych. Stężenia powstających związków: dwutlenku węgla i dwutlenku siarki mierzone są za pomocą analizatorów niedyspersyjnych NDIR.

Kształt cząstek stałych określany jest poprzez obserwacje prowadzone przy użyciu mikroskopów elektronowych. Badania rozkładu wymiarowego cząstek stałych prowadzi się wykorzystując do tego celu [5, 13]:

- **impaktory** – cząstki stałe są przesiewane przez stos płytek, w których wywiercono kalibrowane otworki. Średnice otworków dla kolejnych płytek są coraz mniejsze. Następnie określa się wagowo masę cząstek zgromadzonych na poszczególnych płytkach,

- **elektryczne liczniki cząstek bądź elektryczne analizatory aerozoli** – pomiar liczby i rozmiarów cząstek stałych wykonywany jest na podstawie ich ruchliwości elektrycznej. Cząstkom zawartym w spalinach dostarczony zostaje ładunek elektryczny. Pomiar rozkładu widma jest wykonywany podczas przepływu spalin przez elektrometr. Metoda obarczona jest dużym błędem zwłaszcza w przypadku małych cząstek,
- **fotografowanie** – na podstawie wykonanych za pomocą mikroskopu elektronowego fotografii określa się rozmiary cząstek stałych,
- **holografie laserową** – pozwala uzyskiwać trójwymiarowy obraz każdej cząstki z populacji. Możliwa jest bieżąca analiza wymiarowa cząstek stałych podczas kolejnych cykli testu badawczego.



Rys. 6. Metoda płomieniowo-jonizacyjna pomiaru emisji cząstek stałych

Właściwości chemiczne cząstek stałych emitowanych ze spalinami tłokowych silników spalinowych badane są przy wykorzystaniu następujących metod [12]:

- **chromatografii ciekowej lub gazowej** – pozwalającej na wydzielanie z badanej próbki czystych związków,
- **spektrometrii masowej** – umożliwiającej określenie masy wydzielonych prostych związków chemicznych,
- **analizy spektralnej** – umożliwiającej wykrycie obecności danej substancji i określenie jej ilości,
- **chemii mokrej** – umożliwiającej wykrycie danej substancji,
- **metod elektrochemicznych** – pozwalającej na określenie zawartości rozpuszczalnych tlenków, głównie dwutlenku siarki.

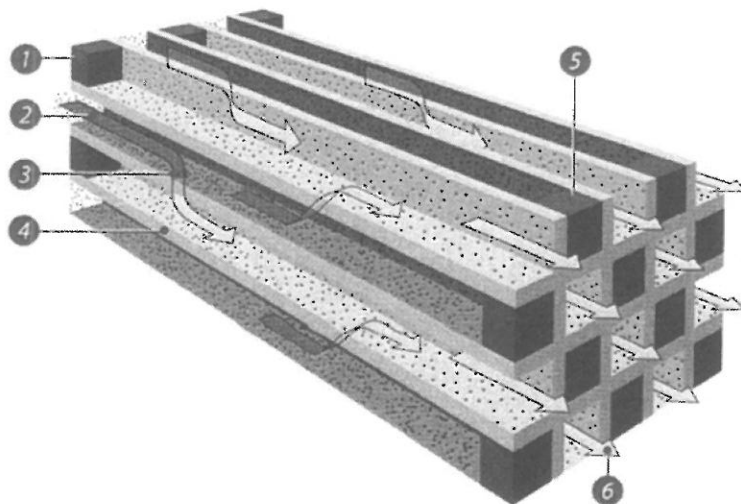
Zgodnie z wymaganiami normatywnymi w badaniach homologacyjnych emisja cząstek stałych jest określana masowo. Nanocząstki, którym przypisuje się największe szkodliwe oddziaływania na człowieka, w tym również rakotwórcze, licznie stanowią największą grupę cząstek zawartych w spalinach. Masa tych cząstek stanowi jednak tylko niewielki ułamek całkowitej masy emitowanych cząstek stałych z silników. To powoduje, że w przyszłości limity masowe emisji cząstek stałych mogą zostać zastąpione limitami ilościowymi.

## 5. Filtry cząstek stałych

Filtr cząstek stałych jest skuteczną, pozasilnikową metodą ograniczania emisji cząstek stałych z silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Jego nazwa handlowa pochodzi z języka angielskiego DPF – Diesel Particulate Filter, lub francuskiego FAP – Filtre à Particules. Objętość filtra w przybliżeniu wynosi około 1,5 do 2,5 razy pojemności skokowej silnika. Okrągły kształt filtra wynika z dążenia do równomiernego rozłożenia pochłanianych cząstek stałych w całej jego pojemności. Materiałem filtrującym stosowanym w budowie filtrów cząstek stałych jest ceramika kordierytowa (węglan krzemu o porowatej strukturze) pokryta tlenkami ginu lub krzemu. Inne stosowane materiały filtracyjne to związki tytanu z aluminium, metale o strukturze porowatej lub piankowej [18]. Monolit filtra składa się z dużej liczby ka-



nałów o przekroju kwadratowym. Ich ukształtowanie jest podobne do reaktorów katalitycznych. Różnica polega na tym, że w przypadku filtrów cząstek stałych kanały te są naprzemiennie zaślepione z jednej strony. Budowa taka wymusza przepływ spalin przez ścianki kanałów. Cząstki stałe osadzają się w porowatym materiale ścianek filtra. Na ściankach filtra zatrzymywane są cząstki węgla o wymiarze nawet 0,0001 mm. Dzięki temu skuteczność filtrów cząstek stałych wynosi 99%. Zasada działania filtra cząstek stałych została przedstawiona na rysunku 7.



Rys. 7. Zasada działania filtra cząstek stałych: 1, 5 – zaślepki kanałów, 2 – wstępnie oczyszczone spaliny z sadzą, osadzanie się cząstek stałych w warstwie filtracyjnej, 4 – warstwa filtracyjna, 6 – oczyszczone spaliny

Filtr cząstek stałych nie ma żadnego wpływu na oczyszczanie spalin z składników gazowych takich jak: tlenki węgla, węglowodory, tlenki azotu, czy też tlenki siarki. Filtr cząstek stałych uzupełnia działanie katalizatora. Bardzo często katalizator i filtr cząstek stałych umieszczone są w jednej obudowie i stanowią układ oczyszczania spalin.

Znacząca część cząstek stałych ma średnicę równą kilku dziesiątym części milimetra. Jądro cząstek stałych stanowi węgiel, który nie spala się w cylindrze silnika ze względu na krótki czas trwania procesu spalania. Aby spalić węgiel niezbędna jest wysoka temperatura i długi czas. Takie warunki należy zapewnić w filtrze cząstek stałych. Po nagromadzeniu się cząstek stałych w filtrze należy przeprowadzić proces ich wypalania, czyli oczyszczania filtra. Proces ten zachodzi efektywnie w temperaturach około 600°C. Temperaturę taką trudno uzyskać w układzie wydechowym silników o zapłonie samoczynnym. Jest to możliwe przy pracy silnika z dużą prędkością obrotową i przy prawie maksymalnym obciążeniu. Podczas eksploatacji samochodów silniki rzadko pracują przy takich obciążeniach. W praktyce eksploatacyjnej koniecznym staje się stosowanie rozwiązań umożliwiających regenerację filtrów cząstek stałych bez konieczności pracy silnika przy maksymalnych obciążeniach. Wyróżnić można następujące sposoby kształtowania warunków, przy których możliwy jest proces oczyszczania filtrów cząstek stałych:

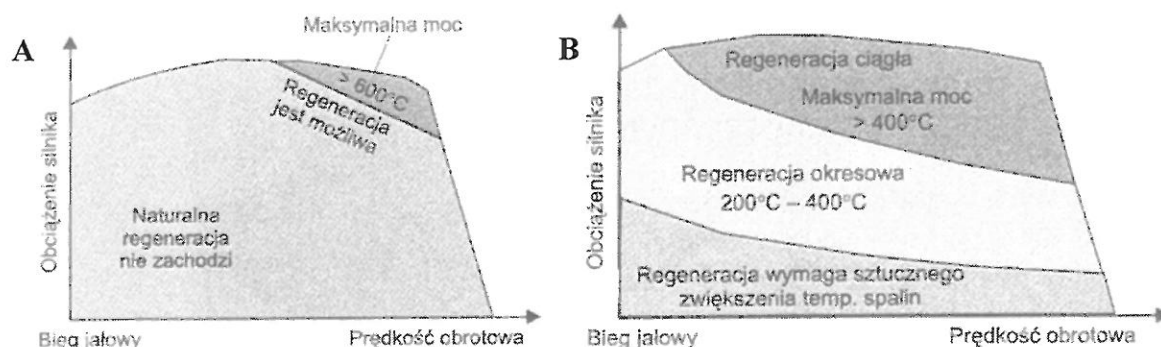
- podnoszenie temperatury spalin przez odpowiednie sterowanie przebiegiem wtrysku paliwa,
- zastosowanie substancji katalitycznych dodawanych do paliwa obniżających minimalną temperaturę regeneracji do około 400°C,
- wprowadzenie warstwy katalitycznej pokrywającej ścianki filtra obniżających temperaturę regeneracji do około 360°C,
- równoczesne zastosowanie substancji katalitycznych i kształtowanie wtrysku paliwa,

- wykorzystanie układu CRT umożliwiającego regenerację już w temperaturze około 250°C.

Wzrost temperatury spalin można uzyskać poprzez zmianę parametrów pracy silnika [18]:

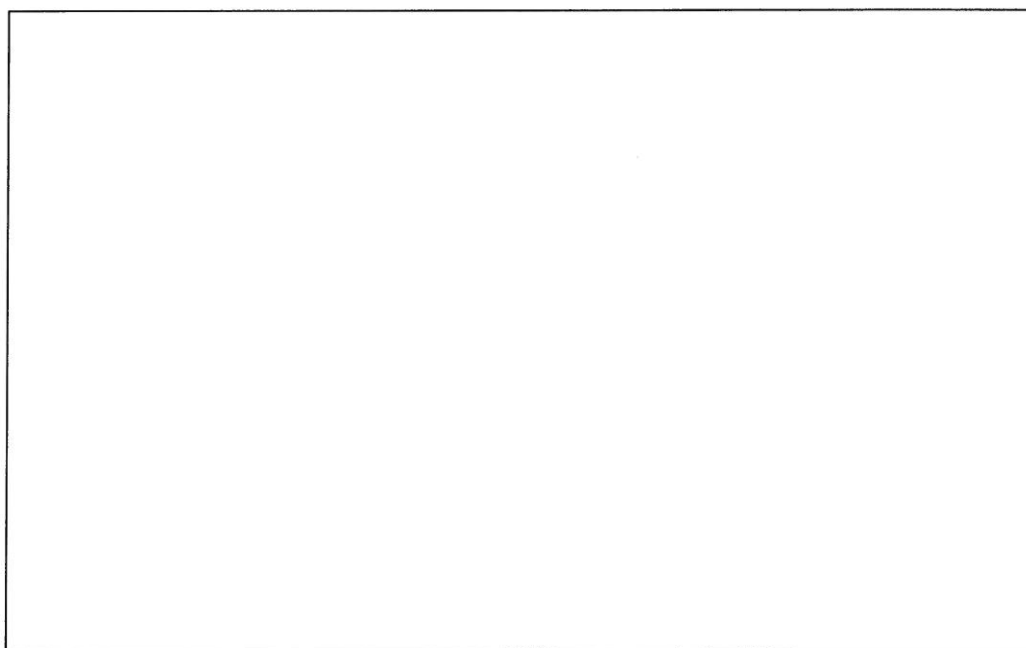
- opóźnienie wtrysku paliwa i wzbogacenie mieszanki,
- zastosowanie powtrysku w suwie wylotu,
- odpowiednie sterowanie pracą turbosprężarki i dławienie przepływu powietrza,
- zmianę stopnia recyrkulacji spalin.

Na rysunku 8 przedstawiono zakres warunków pracy silnika w których zachodzi naturalny proces regeneracji oraz proces regeneracji wspomaganej obecnością katalizatora.



Rys. 8. Zakresy warunków pracy silnika o zapłonie samoczynnym w których jest możliwa regeneracja filtra cząstek stałych: A – naturalna regeneracja; B – regeneracja wspomagana obecnością katalizatora [2]

Filtr cząstek stałych znajduje się w układzie wydechowym silnika zazwyczaj za katalizatorem. Stosowanie filtra wymusza instalację także kilku innych elementów niezbędnych do jego prawidłowego funkcjonowania, takich jak: **czujnik ciśnienia, czujnik temperatury przed i za filtrem, szerokopasmowa sonda lambda** (rys. 9). Informacje z tych czujników zbierane są w sterowniku silnika, który przy pomocy oprogramowania oblicza poziom nasycenia filtra i steruje procesem regeneracji.



Rys. 9. Schemat instalacji filtra cząstek stałych w układzie wydechowym silnika

Gromadzenie się cząstek stałych w filtrze wymaga okresowego ich usuwania w celu uniknięcia przepełnienia filtra i spowodowania niedrożności układu wydechowego. Nagromadzenie cząstek w filtrze powoduje wzrost przeciwcisnienia wydechu. Kiedy zostanie osiągnięta wartość progowa napełnienia, zachodzi konieczność regeneracji filtra cząstek stałych przez ich wypalenie w temperaturze około 600°C. Po zakończeniu regeneracji pusty filtr cząstek stałych zostaje ponownie napełniany, aż do wzrostu przeciwcisnienia wydechu. Napełnianie i regeneracja odbywają się cyklicznie.

Regeneracja filtra cząstek stałych może być [15]:

- **pasywna,**
- **aktywna,**
- **serwisowa.**

**Regeneracja pasywna** jest naturalnym sposobem wypalania cząstek stałych. Temperatura procesu 350°÷500°C możliwa do uzyskania w warunkach długiego obciążenia silnika. W procesie nie bierze udziału sterownik silnika. Podczas regeneracji pasywnej cząstki stałe reagują z dwutlenkiem azotu tworząc dwutlenek węgla. Realizowana jest ona do 50% zapełnienia filtra. Nie jest możliwa przy jeździe miejskiej, gdyż warunki pracy silnika nie pozwalają na uzyskanie właściwej temperatury.

**Regeneracja aktywna** realizowana jest w sytuacji 60% procentowego zapełnienia filtra. Odbywa się przy zaangażowaniu sterownika silnika. Temperatura procesu wynosi około 600°C. Zwiększenie temperatury filtra cząstek stałych uzyskuje się poprzez realizację powtrysku paliwa, który powoduje zwiększoną emisję węglowodorów, które dopalane są w reaktorze katalitycznym. Wynikiem tego jest wzrost temperatury spalin docierających do filtra. Dodatkowo zmniejszana jest masa powietrza doprowadzanego do cylindra oraz zmieniana dawka wtryskiwanego paliwa i moment jej wtrysku. Gdy nasycenie filtra osiągnie 60% kierowca jest informowany o konieczności regeneracji poprzez charakterystyczną kontrolkę na desce rozdzielczej. Skuteczna regeneracja nastąpi wówczas gdy pojazd pozostanie na stałych obrotach powyżej 2000 obr/min, nie krócej niż dziesięć minut.

**Regeneracja serwisowa** jest konieczna kiedy zapełnienie filtra osiągnie stan 70%. Sterownik przechodzi w stan pracy awaryjnej i ogranicza moc silnika. Regeneracja może być wykonana tylko w serwisie za pomocą odpowiedniego diagnosty. Regeneracja serwisowa filtra cząstek stałych obejmuje trzy fazy: rozgrzewania, przejścia do wtrysku specyficznego, chłodzenia. Faza pierwsza polega na automatycznym zwiększeniu prędkości obrotowej silnika do 1500 obr/min i utrzymaniu jej do momentu osiągnięcia przez silnik odpowiedniej temperatury (90°C płynu chłodzącego). Celem tej fazy jest doprowadzenie do rozpoczęcia pracy katalizatora utleniającego. Faza druga polega na tym, że sterownik wtrysku przesuwa fazy wtrysku zgodnie z obrotem wału korbowego i wprowadza dodatkowy wtrysk po tych fazach. Zadaniem tej fazy jest podwyższenie temperatury gazów spalinowych i wypalanie cząstek stałych w filtrze. Czas tej fazy jest uzależniony od początkowego poziomu napełnienia filtra cząstek stałych i nie może przekroczyć 20 min. Faza trzecia polega na utrzymaniu przez około trzy minuty zwiększonej prędkości obrotowej wału korbowego silnika przy realizacji wtrysku zwykłego. Zadaniem tej fazy jest uniknięcie szybkiego schłodzenia filtra cząstek stałych.

W sytuacji kiedy zapełnienie filtra przekroczy 80% pojemności koniecznym staje się wymiana filtra na nowy. Wymiana filtra jest również konieczna kiedy pojazd ma przebieg przekraczający założoną przez producenta wartość. Żywotność filtra wynika z tego, że po każdym wypalaniu filtra pozostają popioły odkładające się w filtrze, zwłaszcza w przypadku stosowania dodatków do paliwa obniżających temperaturę wypalania. Popioły te nie mogą być usunięte podczas eksploatacji silnika, gromadzą się w filtrze i powodują stopniowy wzrost oporów. Wymianę filtra należy wykonać w profesjonalnym zakładzie serwisowym. Po wymianie należy wyzerować licznik filtra za pomocą specjalnego diagnosty, przeznaczonego do danej marki samochodu. Nie wyzerowanie przebiegu filtra spowoduje kłopoty eks-

platacyjne takie jak częsta regenerację czy też niezdolność do wykonania pełnej procedury oczyszczania.

Stosowane filtry cząstek stałych można podzielić na dwie grupy:

- filtry z dodatkiem do paliwa,
- filtry bez dodatku do paliwa.

Filtry z dodatkiem do paliwa wymagają wzbogacania paliwa substancjami, które obniżają temperaturę spalania cząstek stałych. Substancja znajduje się w zbiorniku i dodawana jest do paliwa w ilości odpowiedniej do tego ile paliwa zostało wlane do zbiornika. Ilość dodawanego płynu do zbiornika z paliwem jest określana na podstawie pomiaru stężenia płynu w oleju napędowym. Pomiar wykonywany jest każdorazowo przy odkręceniu wlewu paliwa. Rozwiązanie to często stosuje się w samochodach francuskich, i właśnie od tego wzięło się określenie FAP. Rozwiązanie takie było również stosowane w pojazdach Volkswagena w latach 2004÷2006.

Filtry bez dodatku do paliwa są bezobsługowe. Do ich wykorzystywania nie jest wymagane wzbogacanie paliwa. Montowane są możliwie blisko kolektora wydechowego za turbosprężarką. Często zintegrowane są z katalizatorem utleniającym. To pozwala uniknąć opóźnień w uzyskaniu optymalnej temperatury pracy filtra. Stosowane są również filtry, których regeneracja jest wymuszana poprzez wtrysk odpowiedniej dawki paliwa do kolektora wydechowego, realizowany za pomocą dodatkowego wtryskiwacza. Paliwo spala się w układzie wydechowym podwyższając jego temperaturę i wywołuje wypalanie filtra cząstek stałych.

Innym rozwiązaniem bezobsługowego filtra cząstek stałych jest układ oczyszczania CRT przewidziany do stosowania w autobusach i innych pojazdach użytkowych [18]. Stanowi on połączenie reaktora katalitycznego utleniającego i filtra cząstek stałych zamkniętych we wspólnej obudowie. Filtr systemu CRT nie wymaga stosowania dodatku do paliwa. Jego regeneracja jest możliwa dzięki precyzyjnemu sterowaniu parametrami spalin. Do wypalania cząstek zatrzymanych w filtrze nie wykorzystuje się cząstek tlenu, lecz cząsteczki dwutlenku azotu. Proces regeneracji zachodzi już w temperaturze 250°C. Umieszczony przed filtrem reaktor utleniający powoduje między innymi utlenianie tlenu azotu do dwutlenku azotu. Tlenek azotu nie przyczynia się do wypalania cząstek stałych co ma miejsce w przypadku dwutlenku azotu. Produktami reakcji dwutlenku azotu z cząstkami stałymi są nietoksyczne gazy: azot cząsteczkowy, dwutlenek węgla i para wodna. Warunkiem zachodzenia takich reakcji jest temperatura w zakresie od 250°C do 400°C. Ponadto paliwo nie może zawierać związków siarki. W sytuacji kiedy temperatura jest powyżej 400°C powstaje nadmiar dwutlenku azotu, który nie wchodzi w reakcję z cząstkami stałymi i nie jest neutralizowany. Przy niskich temperaturach ma miejsce niedobór dwutlenku azotu i nie ma możliwości wypalania cząstek stałych i oczyszczania filtra. Związki siarki zwiększają emisję i powodują degradację reaktora katalitycznego.

Filtry cząstek stałych ciągle są doskonałe. Prace w tym zakresie mają głównie na celu ograniczenie ich wpływu na właściwości eksploatacyjne silników wyposażonych w filtry cząstek stałych, wynikające z konieczności ich okresowej regeneracji. Filtrom cząstek stałych stawiane są następujące wymagania [18]:

- skuteczność pochłaniania cząstek stałych przekraczająca 99%, niezależna od warunków pracy silnika,
- zdolność do gromadzenia dużej ilości popiołów będących nieusuwalnym produktem wypalania cząstek,
- filtr nie powinien stanowić nadmiernego oporu dla przepływających spalin,
- nie powinien powodować zwiększenia zużycia paliwa,
- regeneracja filtra powinna być możliwa w szerokim zakresie parametrów pracy silnika i powinna przebiegać szybko i pewnie,



- pojemność filtra powinna zapewniać możliwie długi okres pracy silnika pomiędzy kolejnymi procesami regeneracji,
- zapewnienie trwałości pracy filtra, najlepiej pokrywającej się z całym okres eksploatacji silnika, co stwarza konieczność zastosowania w jego budowie materiałów odpornych na korozję i wysoką temperaturę,
- optymalizacja kształtu kanałów filtrujących i udoskonalenie właściwości warstw pokrywających ścianki filtra.

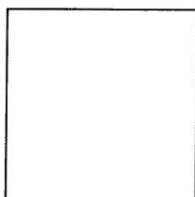
## 6. Budowa i zasada działania analizatora spalin MEXA-1230PM

Analizator MEXA-1230PM przeznaczony jest do ciągłych pomiarów w czasie rzeczywistym ilości cząstek stałych PM w spalinach tłokowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Analizator umożliwia pomiar składników cząstek stałych: rozpuszczalnych związków organicznych - SOF, sadzy – Soot, oraz sumy masy sadzy i rozpuszczalnych związków organicznych. Pobierane przez analizator spaliny mogą być zarówno „surowe”, bezpośrednio z instalacji wylotowej, jak i po rozcieńczeniu w tunelu pomiarowym. Pomiar stężenia sadzy (Soot) dokonywany jest metodą dyfuzyjnego ładowania poprzez pomiar ilości przetransportowanego ładunku elektrycznego, przez naładowane w polu elektrycznym cząstki sadzy. Rozpuszczalne związki organiczne (SOF) mierzone są za pomocą dwóch detektorów FID, jako różnica ich sygnałów dla badanych spalin przy temperaturach 47°C oraz 191°C [1].

System pomiarowy cząstek stałych MEXA-1230PM składa się z (rys. 10):

- szafy głównej zawierającej analizator sadzy, analizator SOF oraz urządzenie do poboru próbek gazów spalinowych,
- kondycjonera prób obejmującego diluter eżektorowy,
- komputera sterującego.

System umożliwia oddzielny pomiar sadzy i rozpuszczalnych związków organicznych. Wyniki pomiarów są wyświetlane na monitorze komputera sterującego a poprzez wyjście analogowe mogą być wysyłane do rejestratora.



Rys. 10. Konfiguracja systemu MEXA-1230PM [1]

System pomiarowy pracuje pod kontrolą komputera w wykonaniu przemysłowym. Komputer steruje trybami pracy całego systemu, zarówno analizatora jak i układu kondycjonowania próbki gazowej. Przeprowadza także autodiagnostykę systemu po jego załączeniu. Urządzenia systemu mogą pracować w kilku trybach:

- konfiguracja systemu,
- kalibracja gazem wzorcowym,
- pomiary,
- obsługa (serwis).

Praca w trybie pomiar oraz kalibracja może przebiegać w sposób „ręczny” lub w sposób automatyczny. Oba sposoby pracy są nadzorowane i rejestrowane przez komputer. W trybie automatycznym komputer także steruje przebiegiem cyklu pracy. Monitorowane są także wszystkie istotne dla procesu pomiaru parametry pracy, jak temperatury w różnych punktach układu, czy przepływy gazu. Dane z analizatora przesyłane są zarówno w formie cyfrowej jak i analogowej. Dane pomiarowe, parametry i statusy pracy obrazowane są na wyświetlaczu LCD. Odświeżanie danych na wyświetlaczu następuje w cyklu 0,5s, natomiast dane wysyłane



przez interfejs odświeżane są co 0,1s. Komputer sterujący umożliwia różne operacje na odbieranych z systemu danych:

- rejestracja danych pomiarowych napływających z analizatora,
- edycja i archiwizacja danych,
- zapis danych pomiarowych w formacie „txt”, umożliwiającym prosty eksport do bardzo wielu aplikacji, jak np. programy MS Office: Excel, Word, czy Access.

Urządzenie obsługiwane w pełni automatycznie przez program zarządzający z dodatkowymi funkcjami:

- edycja wszystkich mierzonych chwilowych wartości, możliwość uśredniania,
- archiwizacja danych pomiarowych,
- autodiagnostyka analizatora PM z edycją stanu,
- działanie manualne w trybie obsługi: testowania, ustawiania i serwisowej,
- działanie manualne w trybie testowania i kalibracji gazami kalibracyjnymi, realizowanymi przed czujnikami analizatorów lub w torze pomiarowym – zgodnie z normami ISO.
- ciągłe automatyczne sterowanie i monitorowanie przepływem próbki gazu (temperatura, ciśnienie, strumień) w celu zapewnienia niezawodnej i wysokiej jakości pomiaru,
- interfejs wyjścia pozwalający włączyć urządzenie do sieci, dla transmisji danych i parametrów stanu pracy urządzenia.

Zakresy pomiarowe analizatora MEXA-1230PM są następujące:

- sadza (Soot): 0 – 15/75/150 mg/m<sup>3</sup>,
- rozpuszczalne związki organiczne (SOF): 0 – 150 mg/m<sup>3</sup>,
- całkowita ilość cząstek stałych PM: 0 – 300 mg/m<sup>3</sup>.

Pomiar stężenia sadzy (Soot) w analizatorze MEXA-1230PM dokonywany jest metodą dyfuzyjnego ładowania przy wykorzystaniu elektrycznego detektora aerozolu (EAD) Model 3070A [14]. Jego zasada działania polega na ładowaniu dyfuzyjnym napływających cząstek aerozolu, gromadzeniu tych cząstek na izolowanym elektrycznie filtrze z materiału przewodzącego, podłączonym do wejścia czułego elektrometru. Wielkość mierzonego przez elektrometr prądu zależy od rozkładu wielkości i koncentracji napływającego aerozolu. Urządzeniem ładującym jest jonizator koronowy typu strumieniowego. Jonizator wykorzystuje do jonizacji igłę platynową. Na igle jonizatora wytwarzane są jednobiegunowe jony powietrza. Są one na igle omiatane przez silny strumień czystego powietrza z kryzy (1,0 l/min). W komorze mieszania o pojemności około 10 cm<sup>3</sup> strumień ten zderza się ze strumieniem aerozolu płynącego w przeciwnym kierunku (1,5 l/min). W komorze tej nie występuje pole elektrostatyczne. Zawirowania powstałe wskutek zderzenia się obu strumieni poprawiają wymieszanie aerozolu z jednobiegunowymi jonami. Podczas przebywania w komorze mieszania większość cząstek aerozolu osiąga stan granicznego naładowania. Dla cząstek aerozolu o wielkości od 10 do 1000 nm, ładowanych w jonizatorze koronowym typu strumieniowego, średni ładunek cząstki jest proporcjonalny do średnicy ruchliwości elektrycznej cząstek. Prąd wypadkowy w elektrometrze jest proporcjonalny do sumy średnic wszystkich cząstek w jednostce objętości. Rzeczywiste parametry różnią się ze względu na straty wynikające z rozmiarów cząstek przechodzących z jonizatora do elektrometru. Na wylocie z komory mieszania znajduje się współosiowy filtr elektrostatyczny, który usuwa nadmiar jonów powietrza o wysokiej ruchliwości, dzięki czemu nie mają one wpływu na prąd mierzony przez elektrometr. Natężenie pola elektrofiltru i czas przelotu są dobrane w taki sposób, aby nie miało to znaczącego wpływu na cząstki o średnicy powyżej 10 nm obdarzone pojedynczym ładunkiem. Po wyjściu z pułapki jonowej aerozol wchodzi do klatki Faradaya, w której naładowane cząstki są gromadzone na filtrze. Filtr jest wykonany z materiału przewodzącego i jest elektrycznie podłączony do wejścia wzmacniacza czułego elektrometru. Prąd z cząstek przekazywany jest na filtr przewodzący i mierzony przez bardzo czuły wzmacniacz. Wzmocniony sygnał elek-

trometru jest przekształcany na postać cyfrową za pomocą 24-bitowego konwertera. Przepływami steruje mikroprocesor, który mierzy również parametry pracy. Wskazania są aktualizowane raz na sekundę a sygnały wyjściowe nawet z szybkością 3.75 razy na sekundę. W skład elektrycznego detektora aerozolu wchodzi cyklon którego zadaniem jest usuwanie cząstek o określonej wielkości ze strumienia wlotowego.

## 7. Literatura

1. Analizator cząstek stałych w czasie rzeczywistym MEXA-1230PM. Instrukcja obsługi.
2. Badania silników spalinowych laboratorium pod redakcją Wojciecha Serdeckiego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
3. Bechmann O., Carli S., Engeler W., Garbe T., Lach G., Ryan L., Schindler K.P.: Particulate emissions and their measurement in practice: Today and in the future. FORUM PARTIKEL EMISSIONEN 2002, s. 33÷51.
4. Ekert K.: Analiza zmian emisji cząstek stałych przy zasilaniu paliwem rzepakowym silnika ZS. Journal of KONES Internal Combustion Engines vol 11, No 1-2, Warszawa 2004, s. 147÷156.
5. Gronowicz J.: Ochrona środowiska w transporcie lądowym. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań – Radom 2004.
6. Jakólski J., Kacperski T. W.: Emisja spalin silników wysokoprężnych i ich wpływ na przyrodę i organizm człowieka. IV Sympozjum EKODIESEL'98, Warszawa 1998, s. 347÷353.
7. Kowalewicz A.: Podstawy procesów spalania. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
8. Kowalewicz A.: Wybrane zagadnienia samochodowych silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
9. Kruczyński S. W.: Wybrane metody ograniczania emisji tlenków azotu w silnikach o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, Warszawa-Radom 2002.
10. Merkisz J.: Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
11. Merkisz J.: Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
12. Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Tom I. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
13. Merkisz J., Pielecha I.: Przegląd systemów pomiarowych cząstek stałych. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Pojazd a Środowisko, Radom 2003, s. 299÷314.
14. Model 3070A. Elektryczny detector aerozolu. Instrukcja obsługi.
15. Olszowiec P.: Filtry cząstek stałych. Auto Moto Serwis 12/2009, s. 14÷18.
16. Oppenheim A. K.: Combustion in piston engines. Springer Verlag, 2004.
17. Pośniak M., Jankowska E., Szewczyńska M., Zapór L., Brochocka A., Pietrowski P.: Zagrożenia Spalinami silników Diesla. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2010.
18. Rokosch U.: Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.
19. Zabłocki M., Ekert K.: Emisja nanocząstek nowym wyzwaniem dla silników z zapłonem samoczynnym. IV Sympozjum EKODIESEL'98, Warszawa 1998, s. 15÷21.

