prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
dr inż. Jacek Pielecha
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR"

Nowoczesne systemy pomiarowe cząstek stałych emitowanych przez silniki spalinowe

W dobie znacznie zaostrzanych przepisów toksyczności spalin, a także gwałtownego rozwoju silników o zapłonie samoczynnym (ZS), zwraca się znaczną uwagę na emisję cząstek stałych. W artykule przedstawiono budowę cząstki stałej, przepisy ograniczające emisję cząstek stałych, systemy rozcieńczania spalin oraz metody pomiaru masy cząstek stałych, bazujące na poborze próbki spalin z tunelu rozcieńczającego.

Symbole i oznaczenia

AC	Alternating Current – *prąd przemienny*
ANR	*All New Registrations* – wszystkie nowe rejestracje pojazdów
CH_4	metan
CO	tlenek węgla
CO_2	dwutlenek węgla
CVS	*Constant Volume Sample* – stała objętość próbki (układ rozrzedzający spaliny powietrzem o stałym natężeniu przepływu)
DC	*Direct Current* – prąd stały
DeNOx	*Decrease NO_x* – reaktor katalityczny redukujący NO_x (do silników ZS)
DPF	*Diesel Particulate Filter* – filtr cząstek stałych do silników ZS
DR	*Dilution Ratio* – stopień rozcieńczenia
ECE	*Economic Commission for Europe* – Europejska Komisja Gospodarcza
EEV	*Enhanced Environmentally Friendly Vehicle* – pojazd przyjazny środowisku
EGR	*Exhaust Gas Recirculation* – recyrkulacja spalin
ELR	*European Load Response Test* – europejski test obciążenia dla silników ZS
EOBD	*European On-Board Diagnostic* – europejski system diagnostyki pokładowej
ESC	*European Stationary Cycle* – europejski test stacjonarny dla silników ZS
ETC	*European Transient Cycle* – europejski test niestacjonarny dla silników ZS
EUDC	*Extra Urban Drive Cycle* – pozamiejski europejski test jezdny
FFDS	*Full Flow Dilution System* – pełnoprzepływowy tunel rozcieńczający
FID	*Flame Ionisation Detector* – czujnik płomieniowo-jonizacyjny
FTP	*Federal Test Procedure* – federalny test jezdny USA
G_{sp}	strumień spalin
HC	węglowodory
HDD	*Heavy Duty Diesel* – silnik do pojazdów ciężarowych
HDV	*Heavy Duty Vehicle* – ciężki pojazd ciężarowy
INSOL	*Insoluble* – frakcja nierozpuszczalna cząstek stałych
k	współczynnik absorpcji
LDD	*Light Duty Diesel* – silnik ZS do lekkich pojazdów użytkowych
LDV	*Light Duty Vehicle* – lekki pojazd użytkowy
n	prędkość obrotowa
NDIR	*Non-Dispersive Infrared* – analizator niedyspersyjny na podczerwień
N_e	*moc użyteczna*
NEDC	*New European Driving Cycle* – nowy europejski cykl jezdny – zmodyfikowany ECE R83 (tzw. Eurotest) z natychmiastowym poborem spalin
NMHC	*Non Methane Hydrocarbons* – węglowodory bez udziału metanu
NO_x	tlenki azotu
NTA	*New Type Approvals* – zatwierdzenie nowego typu
PC	*Passenger Car* – samochód osobowy
PFDS	*Partial Flow Dilution System* – częściowoprzepływowy tunel rozcieńczający
PM	*Particulatte Matter* – cząstki stałe
S	siarka
SCR	*Selective Catalytic Reduction* – selektywna katalityczna redukcja
SO_2	dwutlenek siarki
SO_3	trójtlenek siarki
SOF	*Soluble Organic Fraction* – rozpuszczalna frakcja organiczna cząstki stałej
UDC	*Urban Driving Cycle* – europejski miejski cykl jezdny
u_i	współczynnik wagowy faz w teście
ZI	silnik o zapłonie iskrowym
ZS	silnik o zapłonie samoczynnym

1. WPROWADZENIE

W związku z wyższą sprawnością silników ZS w porównaniu z silnikami ZI oraz faktem mniejszego zużycia paliwa, a w konsekwencji zmniejszenia emisji dwutlenku węgla, coraz więcej uwagi poświęca się silnikom ZS. Postulaty ekologów o globalnym ociepleniu również przemawiają za coraz szerszym stosowaniem silników ZS. Najistotniejszą kwestią jest jednak emisja cząstek stałych PM z silników spalinowych (dotyczy to nie tylko silników ZS, ale również nowoczesnych silników ZI o bezpośrednim wtrysku paliwa).

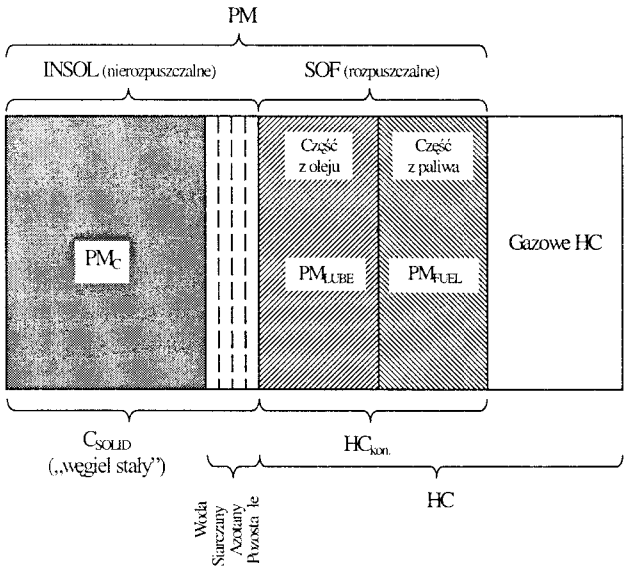
Rozwój przepisów dotyczących ograniczania emisji spalin spowodował znaczną redukcję emisji PM z silników spa-

linowych. Fakt ten spowodował problemy z dokładnym określaniem masy cząstek stałych emitowanych przez silniki. Obecnie stosowana metoda homologacyjna wykorzystuje pomiar za pomocą filtra, a następnie określa się wagowo masę cząstek stałych. Metoda ta nie pozwala na otrzymywanie wyników w czasie rzeczywistym (np. w badaniach dynamicznych), ma tylko zastosowanie do badań statycznych, rozwojowych i homologacyjnych.

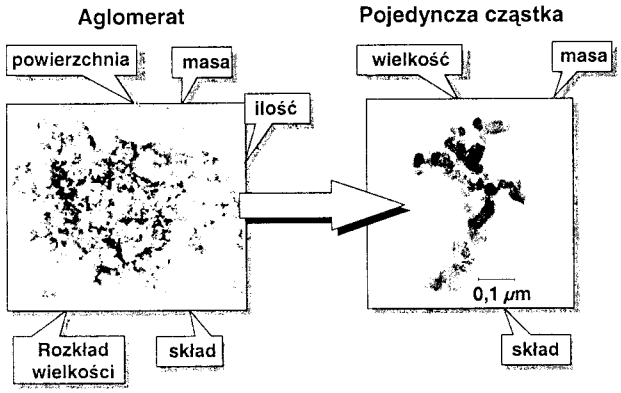
2. BUDOWA CZĄSTKI STAŁEJ

Najczęściej pod pojęciem cząstek stałych (spotykane oznaczenia: PM = PM_T = PM_{TOTAL} = PMT = PT) w pomiarach silników spalinowych rozumie się całą materię stałą lub ciekłą, organiczną lub nieorganiczną, która gromadzi się na filtrze absolutnym (o skuteczności 99%, zatrzymującym części stałe o wymiarach ≥ 0,3 μm), po przejściu przez niego strumienia rozcieńczonych powietrzem spalin o temperaturze 52±3°C [4].

W skład cząstek emitowanych przez silniki spalinowe wchodzą ciała stałe oraz ciekłe, które zależnie od warunków fizycznych (temperatura, ciśnienie) ulegają kondensacji (rys. 1). Część stałą cząstek stanowią głównie aglomeraty niespalonego węgla (w postaci sadzy) oraz niewielkie ilości węglowodorów ciekłych z paliwa i oleju smarującego, a także ze związków metali pochodzących ze zużycia metalowych elementów silnika [22, 24]. Pojedyncze cząstki łączą się w aglomeraty, których właściwości można scharakteryzować przez: masę, powierzchnię całkowitą, rozkład widmowy a także skład chemiczny (rys. 2) [5, 6]. Do części ciekłej należy niespalony olej smarujący i paliwo. Tworzy ona tzw. rozpuszczalną frakcję organiczną cząstek SOF, która zawiera także wielopierścieniowe związki aromatyczne. Obecność siarki jest związana przede wszystkim z jej zawartością w paliwie. W spalinach występować może jako SO_2 i SO_3, tworzący w emitowanych cząstkach kwas siarkawy oraz siarczany. Udział frakcji SOF w masie cząstek może wahać się od 10 do 90%, przy czym zwykle wzrasta wraz ze zmniejszaniem obciążenia silnika (niższa temperatura spalin) [3, 25].



Rys. 1. Schemat budowy cząstki stałej [25]



Rys. 2. Wielkości charakteryzujące cząstki stałe [5]

3. PRZEPISY OGRANICZAJĄCE EMISJĘ CZĄSTEK STAŁYCH

3.1. Badania na hamowni podwoziowej

Pojazdy o masie całkowitej mniejszej niż 3500 kg są wyposażone w silniki ZI, jak i ZS, określane w przepisach jako LDV. W zastosowaniach drogowych, najliczniejszych i najwcześniej poddanych normowaniu, badania certyfikacyjne pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi można podzielić na kategorie, które warunkują narzuconą metodykę badań (tab. 1).

Badania tych pojazdów przeprowadza się na hamowni podwoziowej (rolkowym stanowisku dynamometrycznym). Stosowane są przeważnie hamownie z silnikiem prądu stałego DC, a wprowadza się hamownie z asynchronicznym silnikiem prądu przemiennego AC. W badaniach emisji związków szkodliwych w spalinach stosuje się powszechnie hamownie podwoziowe z podwójnymi rolkami o średnicy rolek 20" (508 mm). Od kilku lat są wprowadzone również hamownie z pojedynczą rolką o średnicy 48". W Europie jednak w większości laboratoriów stosuje się hamownie o podwójnych rolkach, ze względu na spełnienie wymagań i wystarczającą dla tego typu badań dokładność odwzorowania krzywej oporów ruchu pojazdu. Hamownie podwoziowe są przeznaczone do dokładnej symulacji ściśle określonych warunków jazdy pojazdu na drodze, w testach kontrolnych według cykli, takich jak ECE R83 lub FTP75 [2, 4].

W Europie – w krajach Unii Europejskiej – obowiązują aktualnie dyrektywy 98/69/EC i 1999/102/EC oraz regulamin ECE R83.05. Określają one badania emisji związków toksycznych w pojazdach kategorii M1, składające się z siedmiu typów prób (tab. 2).

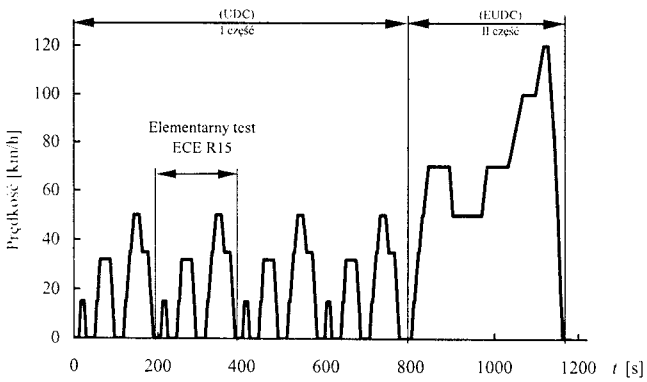
Tabela 1. Kategorie pojazdów LDV [2]

Kategoria pojazdu	Wyszczególnienie
M1 – samochody osobowe	pojazdy o liczbie miejsc nie większej niż 9
M2 – miniautobusy (mikrobusy)	pojazdy o liczbie miejsc nie większej niż 9 i masie własnej nie większej niż 5000 kg
N1 – lekkie pojazdy samochodowe	pojazdy o masie własnej nie większej niż 3500 kg
N2 – średnie pojazdy samochodowe	pojazdy o masie własnej (M): 3500 kg < M ≤ 12 000 kg

Tabela 2. Typy badań emisji wykonywanych dla samochodów osobowych [2]

Typ testu	Silnik ZI	Silnik ZS
I: test NEDC – hamownia podwoziowa	według standardów EURO	
II: emisja podczas pracy na biegu luzem	0,5% CO (objętościowo) na minimalnej prędkości obrotowej	zaczernienie spalin podczas swobodnego przyspieszania – k: 2,5 m^{-1} – silniki niedoładowane, 3,0 m^{-1} silniki doładowane
III: wartość emisji ze skrzyni korbowej silnika w czasie próby I typu	zero	–
IV: emisja parowania	test parowania Σ2 g HC	–
V: emisja (jak w I typie) po przebiegu	80 000 km lub 5 lat, od 1.01.2005 r. – 100 000 km lub 5 lat	
VI: test UDC w –7°C	CO = 15, HC = 1,8 g/km	–
VII: kontrola działania systemu EOBD	od 2000 r.	od 2003 r.

W regulaminie ECE R83.05 (dyrektywa 98/69 EC) stosuje się test NEDC (rys. 3), składający się z testu UDC oraz EUDC, a różniący się od testu wykonywanego do roku 2000, początkiem poboru spalin do analizy bez pomijania pierwszych 40 s (z tego powodu są wyższe średnie emisje drogowe tlenku węgla i węglowodorów). Wersja regulaminu ECE R83.05 (tzw. EURO III) obowiązuje od roku 2000. Następna wersja – EURO IV jest planowana do wprowadzenia w latach 2004/2005. Od roku 1999 wprowadzono nową kategorię pojazdów EEV z silnikami ZS. Średnie emisje drogowe dla wersji EURO III i EURO IV dotyczą zmodyfikowanego testu jezdnego NEDC (tab. 3) [2, 30].



Rys. 3. Przebieg prędkości pojazdu w teście NEDC (UDC + EUDC) [2]

Tabela 3. Limity emisji PM dla pojazdów typu PC i LDV z silnikami ZS w teście NEDC [2]

Norma	Kategoria pojazdów	Masa własna [kg]	PM [g/km]	Data wprowadzenia NTA/ANR
EURO III	M1	wszystkie	0,05	1.01.2000/1.01.2001
	N1	≤ 1305	0,05	1.01.2000/1.01.2001
		>1305÷1760	0,07	1.01.2001/1.01.2002
		> 1760	0,10	1.01.2001/1.01.2002
EURO IV	M1	wszystkie	0,025	1.01.2005/1.01.2006
	N1	≤ 1305	0,025	1.01.2005/1.01.2006
		>1305÷1760	0,04	1.01.2006/1.01.2007
		> 1760	0,06	1.01.2006/1.01.2007
EURO V*)	M1	Wszystkie	0,0025	1.01.2008
	N1	≤ 1305	0,0025	1.01.2008
		>1305÷1760	0,0025	1.01.2008
		> 1760	0,0032	1.01.2008
EEV	–	–	0,01	–

*) *Limity emisji cząstek stałych jednolite dla silników ZS oraz ZI o bezpośrednim wtrysku paliwa.*

3.2. Badania na hamowni silnikowej

Badania silników ZS (do napędu pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg) pod względem toksyczności spalin wykonuje się na hamowni silnikowej (klasyfikacja pojazdów – tab. 4). Są to prawie wyłącznie silniki o wtrysku bezpośrednim HD-DI-D. Obecnie obowiązująca dyrektywa 1999/96/EC (EURO III) została wprowadzona w roku 2000. Test ECE R49 (obowiązujący jeszcze do niedawna w krajach europejskich) dla EURO III został zastąpiony przez dwa testy: stacjonarny ESC oraz test dynamiczny ETC. Pomiar zaczernienia spalin wykonuje się w teście ELR [23].

Tabela 4. Europejskie kategorie pojazdów o masie całkowitej większej niż 3500 kg [2]

Kategoria pojazdu	Wyszczególnienie
M3 – autobusy	pojazdy o liczbie miejsc większej niż 9 i masie całkowitej większej niż 5000 kg
N3 – ciężkie pojazdy dostawcze (HDV)	pojazdy o masie całkowitej większej niż 12 000 kg

Test ESC jest wykonywany na hamowni silnikowej w kolejności faz określonych według rysunku 4. Przygotowanie punktu pracy odbywa się w pierwszych 20 sekundach fazy. Dopuszczalny błąd prędkości obrotowej dla punktu pomiarowego wynosi ±50 obr/min, a momentu obrotowego ±2% $M_{o\,max}$ dla badanej prędkości obrotowej. Emisja związków toksycznych jest mierzona jako średnia ważona w teście (z wykorzystaniem współczynników udziału faz). Czas pracy silnika w poszczególnych punktach pomiarowych (fazach) wynosi dwie minuty (wyjątek stanowi pierwsza faza – 4 minuty), a więc cały test trwa 28 minut. Prędkości obrotowe są zdefiniowane następująco (na podstawie charakterystyki pełnej mocy):

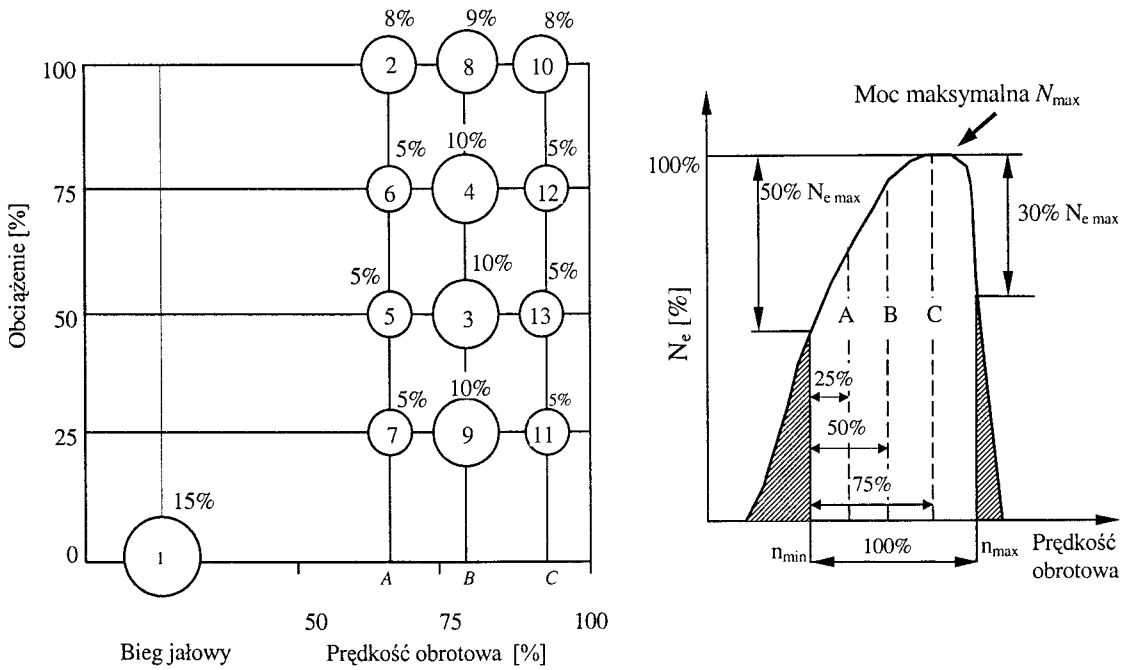
- prędkość obrotowa maksymalna (n_{max}) – po przekroczeniu mocy maksymalnej, gdy silnik uzyskuje 70% $N_{e\,max}$,
- prędkość obrotowa minimalna (n_{min}) – silnik uzyskuje 50% $N_{e\,max}$,
- poszczególne prędkości faz A, B, C oblicza się z zależności:

$$A = n_{min} + 0{,}25(n_{max} - n_{min}),$$

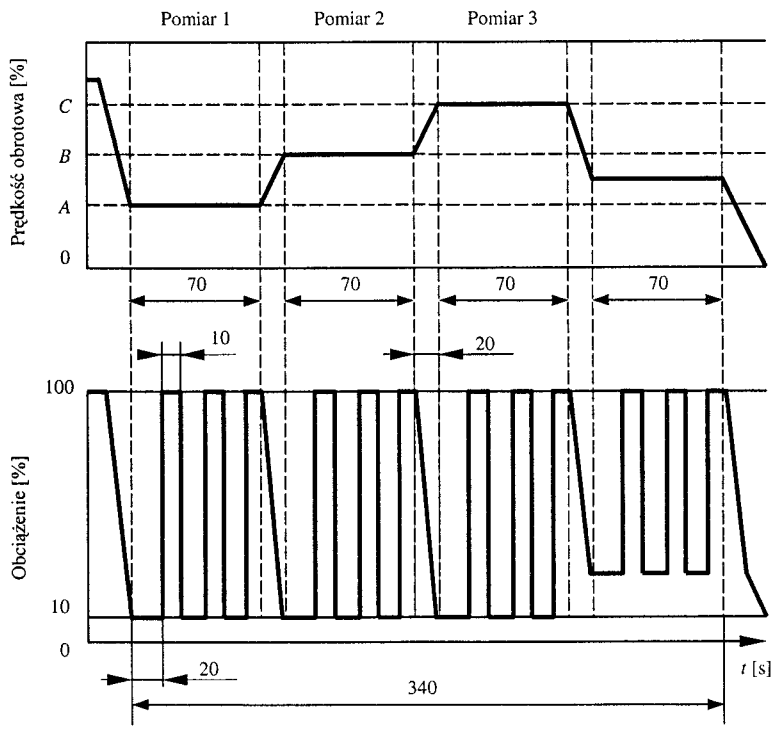
$$B = n_{min} + 0{,}50(n_{max} - n_{min}),$$

$$C = n_{min} + 0{,}75(n_{max} - n_{min}).$$

Łącznie z testem ESC jest wykonywany pomiar zaczernienia spalin w teście ELR (rys. 5) – charakterystyczne punkty pomiarowe określono na podstawie schematu testu ESC. Wartość współczynnika absorpcji (k) określa się na podstawie formuły obliczeniowej $k = 0{,}43k_A + 0{,}56\,k_B + 0{,}01\,k_C$, gdzie k_A, k_B, k_C to współczynniki absorpcji [m^{-1}] w punktach pomiarowych.



Rys. 4. Schemat stacjonarnego testu ESC; wartości procentowe oznaczają współczynniki wagowe faz [2]



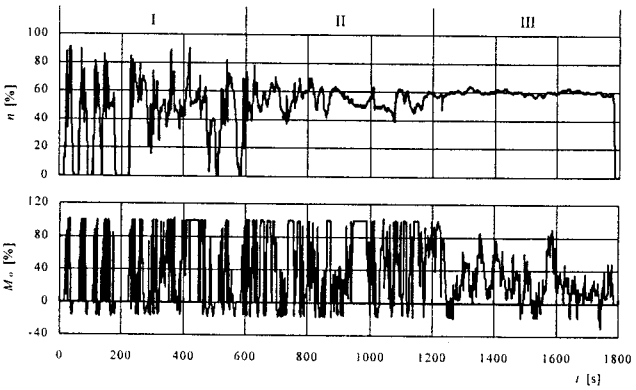
Rys. 5. Schemat europejskiego testu obciążenia (ELR) dotyczącego pomiaru zaczernienia spalin według normy EURO III [2]

Test ETC, wykonywany na hamowni silnikowej jako dynamiczny, jest określony przez prędkość obrotową silnika i moment obrotowy w funkcji czasu (rys. 6). Czas trwania testu wynosi 1800 s i można wyodrębnić w nim trzy części:

- pierwsza – reprezentująca jazdę miejską (ruszanie z miejsca, zatrzymanie i praca silnika na biegu jałowym; I),
- druga – jazda podmiejska ze stopniowym przyspieszaniem (II),
- trzecia – reprezentująca jazdę na autostradzie (III).

Według normy EURO III test ESC obowiązuje (jako główny) dla wszystkich nowych silników ZS *Heavy Duty*, jednakże silniki wyposażone w filtr cząstek stałych lub reaktor DeNOx (do redukcji tlenków azotu) muszą też spełniać limity w teście ETC (tab. 5). Dla silników zasilanych gazem obowiązuje tylko test ETC (z pomiarem NMHC i bez pomiaru cząstek stałych). Natomiast w normie EURO IV jest wymagane spełnienie limitów emisji spalin przez silniki we wszystkich testach toksyczności (ESC + ELR oraz ETC). Pomiar zaczernienia spalin jest realizowany na podstawie testu ELR [25].

Pomiar składników gazowych i cząstek stałych jest odmienny dla testów ESC i ETC. W teście ESC są analizowane spaliny stężone, a do pomiaru emisji cząstek stałych może być używana metoda pomiarowa o częściowym poborze próbki (*Partial Flow Dilution Tunnel*), natomiast w teście ETC są analizowane spaliny rozcieńczone powietrzem (a więc z wykorzystaniem układu CVS i worków pomiarowych), a emisję cząstek stałych mierzy się tylko za pomocą metody o pełnym przepływie spalin (*Full Flow System*). Do celów badawczo-rozwojowych jest możliwy pomiar emisji cząstek stałych w teście ETC przez układ o częściowym poborze próbki jedynie w sytuacji, gdy błąd pomiaru jest mniejszy niż 5% w stosunku do układu o pełnym przepływie spalin. Od normy EURO IV pomiar emisji spalin będzie możliwy również z układu o częściowym poborze próbki spalin [23].



Rys. 6. Schemat dynamicznego testu ETC (ujemny moment reprezentuje obcy napęd) [2]

Tabela 5. Limity emisji cząstek stałych dla silników ZS do pojazdów HDV [2]

Norma	ESC		ETC	Data wprowadzenia NTA/ANR
	PM [g/(kW·h)]	k [m^{-1}]	PM [g/(kW·h)]	
EURO III	0,1/0,13[1)]	0,8	0,16/0,21[1)]	1.10.2000/ 1.10.2001
EURO IV	0,02	0,5	0,03	1.10.2005/ 1.10.2006
EURO V	0,02	0,5	0,03	1.10.2008/ 1.10.2009
EEV[2)]	0,02	0,15	0,02	–

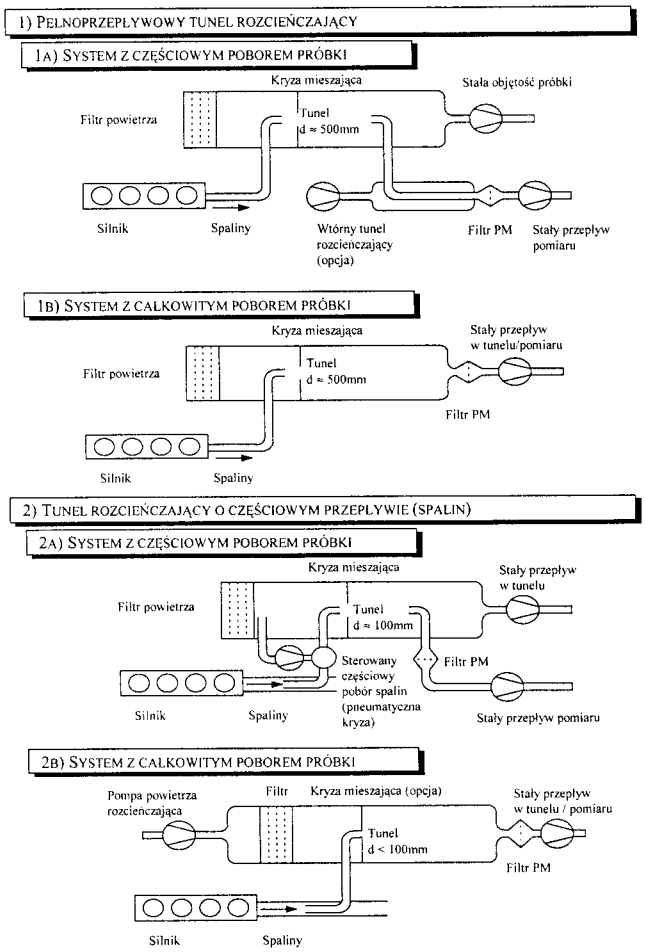
1) Dla silników o pojemności cylindra poniżej 0,75 dm^3 i prędkości obrotowej większej niż 3000 obr/min.

2) Od roku 2000 wprowadzono nową kategorię pojazdów EEV dla pojazdów z silnikami ZS, jako docelową dla silników HDD.

Przewiduje się wprowadzenie normy EURO VI od roku 2010, według której będzie obniżona emisja cząstek stałych do poziomu 0,002 g/(kW·h), a jednocześnie prowadzony będzie pomiar ilości cząstek i rozkładu ich średnic.

4. SYSTEMY ROZCIEŃCZANIA SPALIN

Układom poboru próbek PM stawia się bardzo wysokie wymagania, aby ze względu na charakter tej emisji nie zmienić właściwości badanej próbki (od chwili poboru spalin przez sondą pomiarową występuje wiele mechanizmów mogących zniekształcić wynik). Do mechanizmów mogących wytrącić część PM można zaliczyć: osadzenie grawitacyjne, uderzenia o ścianki rurociągów w czasie przepływu na zakrzywieniach (łukach), ruchy Browna (dyfuzja Browna), sedymentację termiczną a także straty i zmiany właściwości próbki na skutek trwającego wzrostu cząstek i zachodzących reakcji. Generalną zasadą jest stosowanie możliwie krótkich rurociągów, wykonanych ze stali nierdzewnej (ze względu na korozyjne działanie spalin), o gładkich powierzchniach oraz unikanie ostrych łuków i stosowanie odpowiednio dużych średnic wewnętrznych [1, 10, 11]. Wszystkie pomiary homologacyjne wymagają rozcieńczania spalin powietrzem o temperaturze 20÷30°C, przy czym nie może wykroplić się woda, a sam pomiar PM odbywa się w temperaturze 52°C. To mieszanie spalin z powietrzem, o różnym rozcieńczeniu zależnym od warunków pracy silnika i charakteryzowane stopniem rozcieńczania DR, odbywa się w specjalnych urządzeniach zwanych tunelami rozcieńczającymi (*dilution tunel*) – rys. 7 [29].



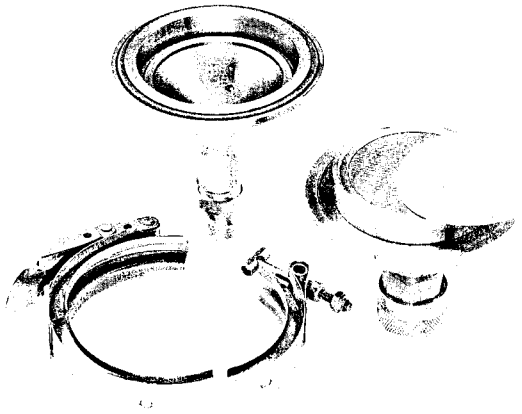
Rys. 7. Systemy poboru spalin (rodzaje tuneli rozcieńczających) [25]

Rozróżnia się dwa zasadnicze systemy tuneli rozcieńczających:

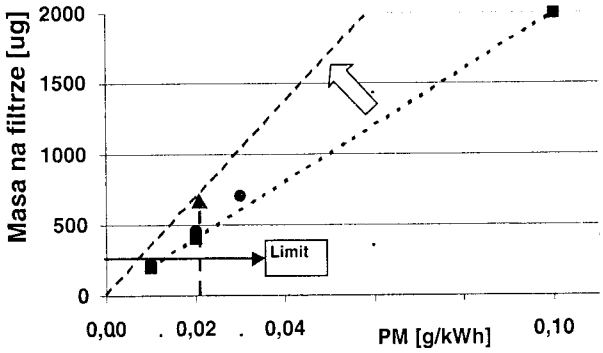
- pełnoprzepływowy FFDS,
- częściowo-przepływowy PFDS.

W pierwszym systemie jest możliwy pomiar PM na filtrze pomiarowym, przez który przechodzi cała wytworzona mieszanina lub stosuje się dodatkowy tunel rozcieńczający, do którego doprowadza się tylko część mieszaniny (wytworzonej w tunelu głównym), kierowanej dalej na filtr pomiarowy (rys. 8 i 9). W drugim systemie stosuje się też dwa podsystemy pomiarowe, w których mieszanina może być kierowana na filtr pomiarowy: dla pierwszego podsystemu w całości (próbkowanie całkowite – rys. 10), a dla drugiego tylko w części (próbkowanie częściowe – rys. 11).

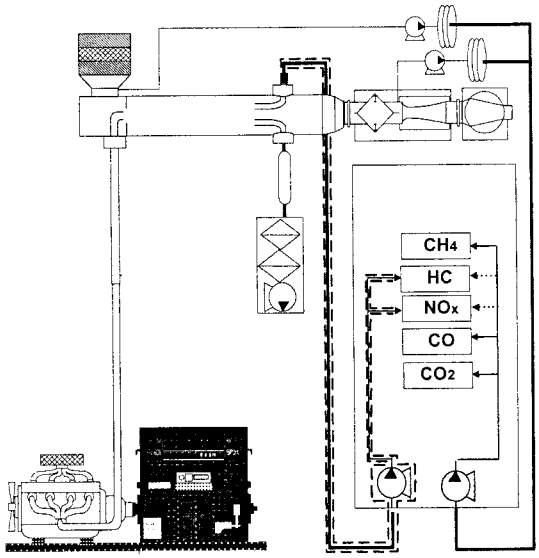
Obecnie przepisy pozwalają na stosowanie drugiego systemu (o częściowym przepływie spalin) do rozrzedzenia i te tunele rozcieńczające nazywa się też „mini tunelami". Ponieważ całkowity przepływ spalin nie musi być kierowany przez filtr, układy tego typu mogą być mniejsze niż układy o pełnym przepływie, lecz są znacznie bardziej skomplikowane i zaawansowane technicznie. Dodatkowym problemem związanym z „mini tunelami" jest wpływ samych tuneli na poziom zawartości PM, ponieważ tworzą się one przede wszystkim poza cylindrem silnika. Większy stosunek powierzchni do objętości i konieczność stosowania dodatkowych rur oddziałuje na chłodzenie oraz stwarza większe możliwości osadzania się osadów na ściankach.



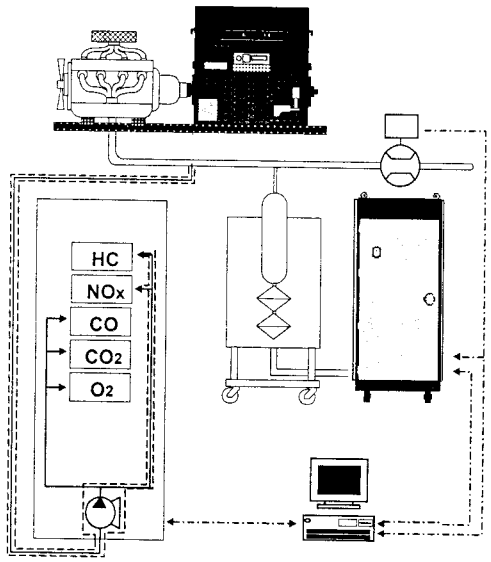
Rys. 8. Filtr z obudową do pomiaru cząstek stałych [21]



Rys. 9. Maksymalna masa cząstek na filtrze od emisji jednostkowej w teście [21]



Rys. 10. Konfiguracja systemu o pełnym przepływie spalin do pomiaru PM i składników gazowych [21]



Rys. 11. Konfiguracja systemu o częściowym przepływie spalin do pomiaru PM i składników gazowych [21]

Podobne warunki termiczne, jak w układach pełnoprzepływowych, mogą być osiągnięte w układach o przepływie częściowym, gdy zostaną starannie dobrane takie parametry, jak stopień rozcieńczenia q oraz temperatury w tunelu i filtrze.

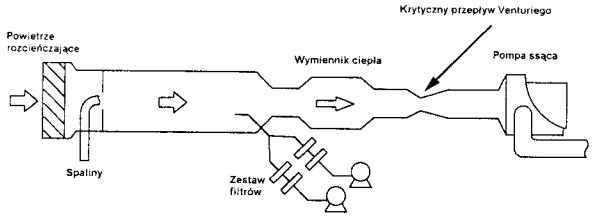
Dla układów jednofiltrowych prawidłowe kształtowanie testu polega na właściwym sterowaniu czasem trwania pomiaru cząstek stałych w poszczególnych jego fazach.

W układach o częściowym przepływie spalin musi być na bieżąco monitorowany iloczyn DR · G_{sp}; gdzie: G_{sp} = strumień spalin) oraz same wielkości DR i G_{sp}. Czasy obciążenia filtra powinny być prawidłowo ustalone w celu uzyskania wymaganych współczynników udziału u_i, w zależności od realizowanego testu badawczego.

Mimo zalet układu pełnoprzepływowego coraz częściej zastępowany jest on układem o częściowym przepływie spalin. Spowodowane to jest uciążliwością przeprowadzania testów przy użyciu jednego systemu pełnoprzepływowego dla silników o różnych wielkościach. W porównaniu z metodą pełnoprzepływową dla układu o częściowym przepływie spalin otrzymuje się wyniki z korelacją 5 do 10%.

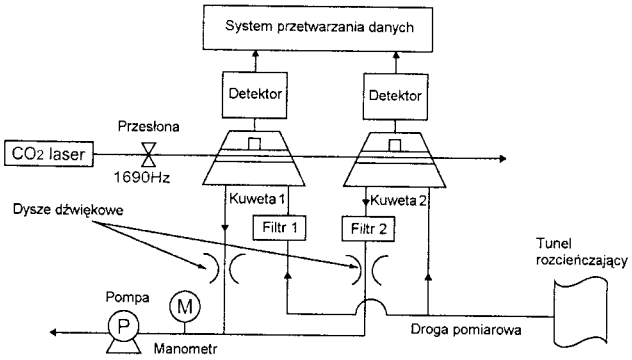
5. POMIAR MASY CZĄSTEK STAŁYCH

5.1. Metoda grawimetryczna polega na bardzo dokładnym (z dokładnością 0,001÷0,005 mg) ważeniu (przed i po pomiarze) pobranej próbki cząstek (wraz z elementem filtrującym, na którym osadzają się PM), w ściśle określonej i stałej temperaturze oraz wilgotności względnej powietrza. Spaliny z układu wylotowego są kierowane do systemu CVS, w którym są mieszane z filtrowanym powietrzem o temperaturze 25±5°C. Część z rozcieńczonych w ten sposób spalin jest przepuszczana przez zestaw dwóch teflonowych filtrów pomiarowych, na których osadzają się cząstki stałe (rys. 12). Temperatura pomiaru cząstek stałych nie powinna być wyższa niż 52±3°C – kontrola odbywa się za pomocą temperatury spalin rozcieńczonych przed filtrem. Metoda ta jest powszechnie uważana za najdokładniejszą, i dlatego jako jedyna dopuszczona jest w badaniach homologacyjnych, a uzyskane na jej podstawie wyniki wykorzystywane są do cechowania pozostałych urządzeń pomiarowych [16, 29].



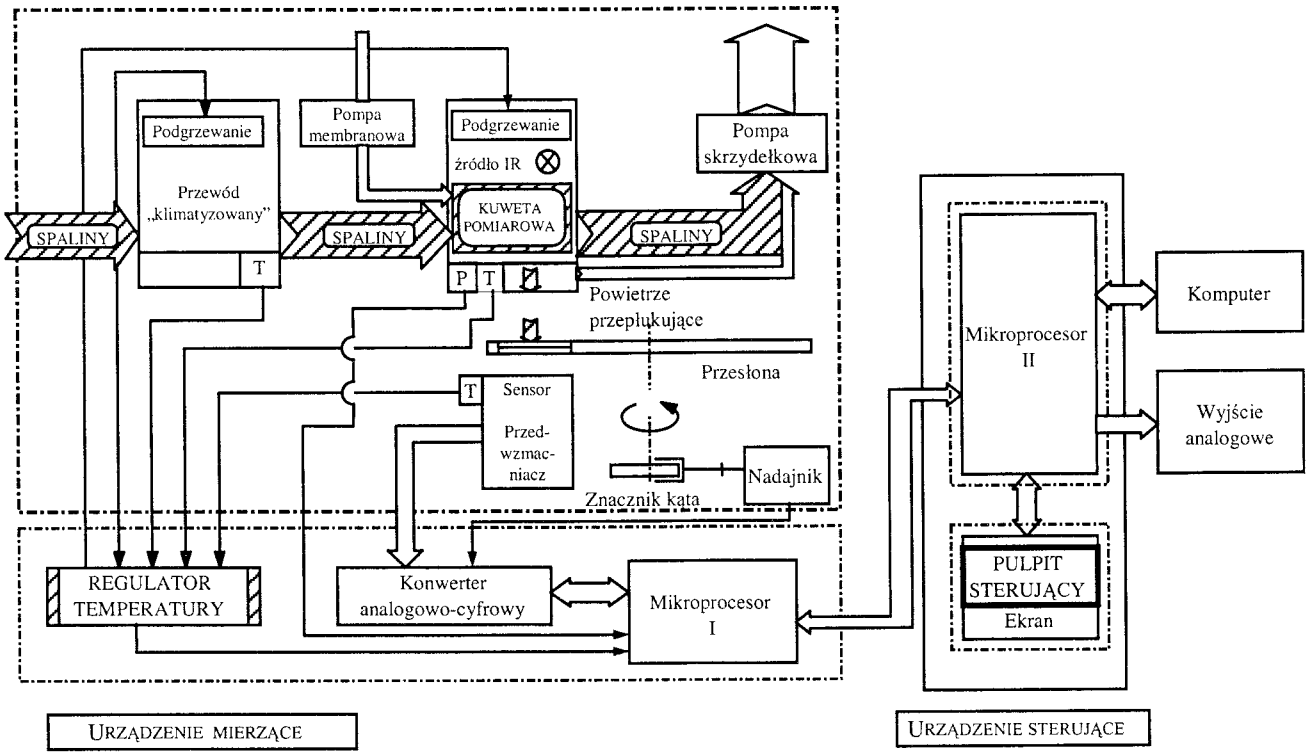
Rys. 12. Schemat poboru próbki w metodzie grawimetrycznej

5.2. Metoda fotoakustyczna, wykorzystująca zjawisko absorpcji przez cząstki stałe części energii wiązki światła, której amplituda modulowana jest w zakresie fal radiowych. Na rysunku 13 przedstawiono schemat ciągłego pomiaru cząstek stałych. Spaliny kierowane są dwoma przewodami do dwóch kuwet pomiarowych, z tym, że jedna droga pomiarowa wyposażona jest w filtr zatrzymujący cząstki stałe. W każdej z kuwet przepływające spaliny pochłaniają wiązkę światła (generowanego laserem CO_2) i jednocześnie generują falę dźwiękową. Dzięki różnicy natężenia dźwięku z obu kuwet pomiarowych można wyznaczyć koncentrację cząstek stałych. Przy znajomości natężenia przepływu spalin można obliczyć masę PM w czasie rzeczywistym. Podobnie jak w metodach optycznych, wynik jest zależny od właściwości optycznych aerozolu, skuteczności użytego filtra i stałości źródła światła. Zaletą tej metody jest bardzo duża czułość, dziesięć razy większa niż metod optycznych [26].



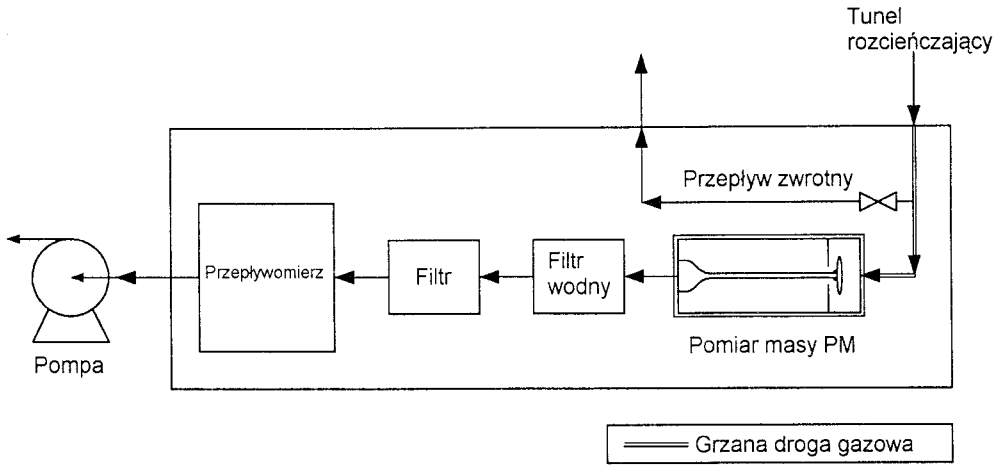
Rys. 13. Schemat metody fotoakustycznej do ciągłego pomiaru PM [26]

5.3. Metoda optyczna, mierząca natężenie wiązki światła przechodzącego przez strumień spalin (NDIR) działa na zasadzie porównania absorpcji promieniowania podczerwonego badanego związku i obojętnego gazu wzorcowego, którego pochłanianie jest równe zero; cechuje ją duża czułość i szybkość uzyskiwania wyników (rys. 14). Masę emitowanych cząstek ocenia się wykorzystując zależności empiryczne. Jednakże ze względu na silną zależność właściwości optycznych od składu chemicznego i wymiarów cząstek stałych spalin, dokładność określenia masy jest stosunkowo mała.



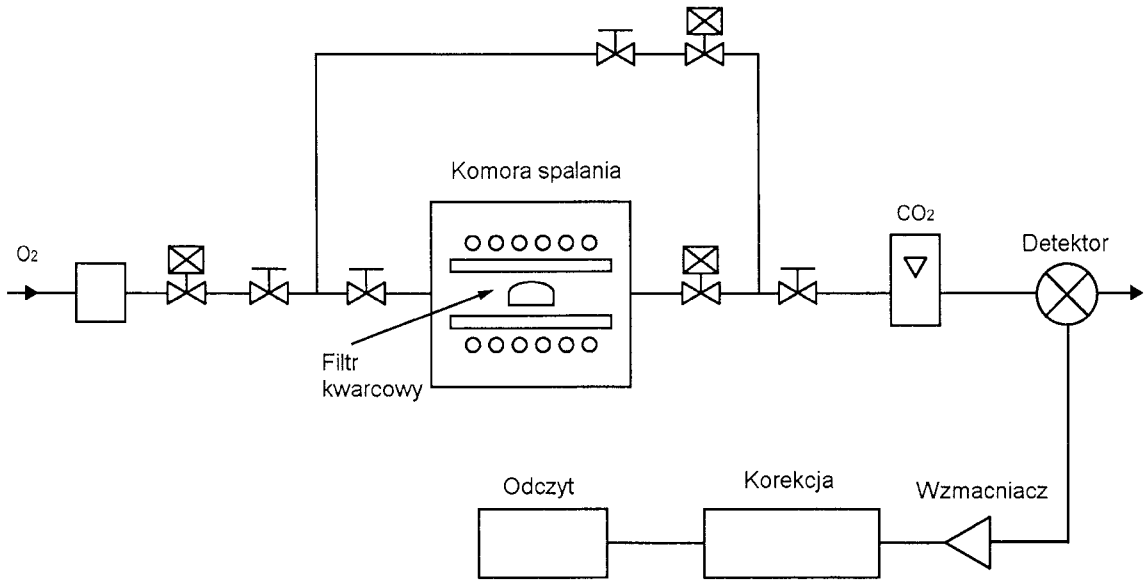
Rys. 14. Schemat metody optycznej do pomiaru PM [21]

5.4. Metoda częstotliwościowa jest oparta na pomiarze zmiany częstości drgań własnych elementu pomiarowego wraz ze zmianą masy osadzonych na nim cząstek stałych (rys. 15). Wynik pomiaru zależy tylko od masy cząstek stałych, a nie od właściwości fizycznych i chemicznych, jednakże błąd tej metody jest dwa razy większy od metody grawimetrycznej. Istnieje możliwość pomiaru masy cząstek lub ich koncentracji, a także pomiaru bardzo małych mas cząstek stałych (10^{-8} g), przy częstotliwości próbkowania – standardowej 2,5 Hz a w specjalnych zastosowaniach do 20 Hz [28].



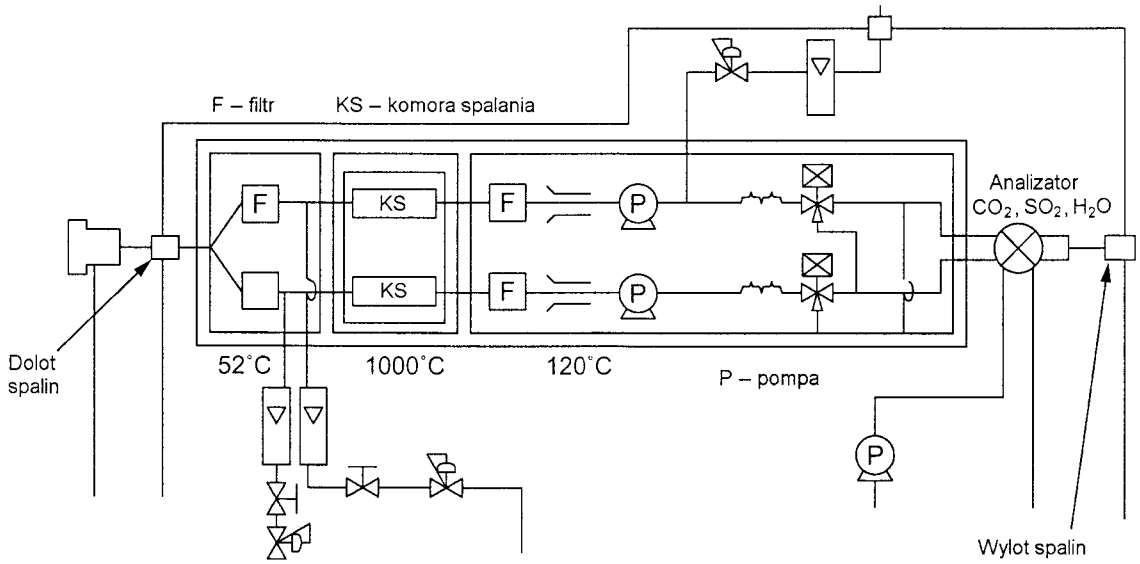
Rys. 15. Schemat metody częstotliwościowej do pomiaru PM [28]

5.5. Metoda utleniania polega na pomiarze PM, zbieranych na filtrze kwarcowym, bezpośrednio z układu wylotowego silnika. W wysokiej temperaturze i przy dostarczeniu tlenu, cząstki stałe ulegają utlenieniu w komorze spalania. Powstający dwutlenek węgla jest mierzony w detektorze, stężenie jego jest proporcjonalne do masy PM (rys. 16).



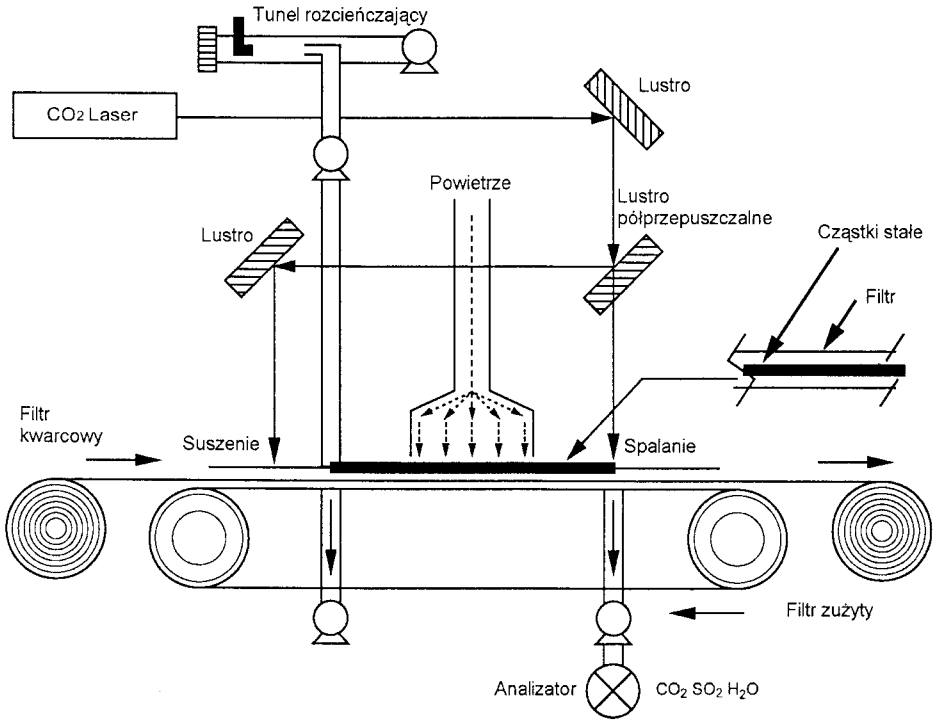
Rys. 16. Metoda spalania filtra do pomiaru PM [8]

5.6. Metoda różnicowa polega na pomiarze różnicy stężenia dwutlenku węgla uzyskanego ze spalania cząstek stałych przechodzących przez osobne komory spalania (rys. 17). Spaliny kierowane są dwoma przewodami do dwóch komór o temperaturze 1000°C, z tym, że jedna droga pomiarowa wyposażona jest w filtr (o temperaturze 52°C) zatrzymujący cząstki stałe. Cząstki stałe w komorze spalania ulegają utlenieniu, w związku z czym powstają: dwutlenek węgla, dwutlenek siarki i para wodna. Związki te mierzone są analizatorami, dzięki czemu możliwy jest pomiar ich składu frakcyjnego oraz masy (przez zsumowanie tych związków).



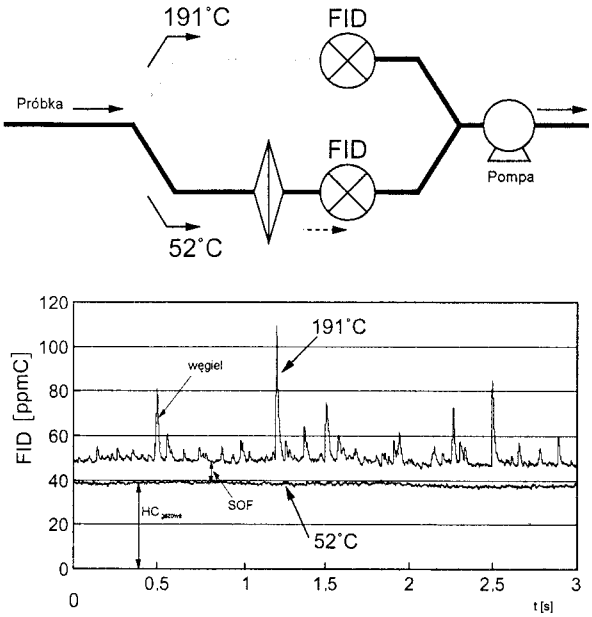
Rys. 17. Metoda różnicowa do pomiaru PM [32]

5.7. Metoda filtra kwarcowego polega na pomiarze cząstek stałych z wykorzystaniem filtra kwarcowego. Cząstki stałe zawarte w spalinach zbierane są na ciągłym filtrze. Pomiar odbywa się z wykorzystaniem wiązki światła lasera, dzięki któremu cząstki zawarte na filtrze ulegają spaleniu. Powstałe w wyniku spalania związki: dwutlenek węgla, dwutlenek siarki oraz para wodna są mierzone w odpowiednich detektorach (rys. 18).



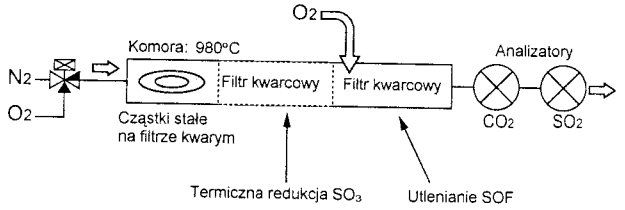
Rys. 18. Schemat metody do pomiaru PM z wykorzystaniem ciągłego filtra kwarcowego [21]

5.8. Metoda płomieniowo-jonizacyjna polega na pomiarze prądu jonizacji płomienia, na skutek spalania gazów wylotowych w płomieniu wodorowym. Koncentracja cząstek stałych jest obliczana jako suma frakcji węglowej oraz rozpuszczalnej frakcji organicznej. Na rysunku 19 przedstawiono schemat przepływu spalin, jak również sygnały odpowiedzi analizatorów FID, podczas pomiaru składników cząstek stałych. Spaliny kierowane są do dwóch analizatorów FID: drogą bezpośrednią o temperaturze 191°C – pomiar całkowitej zawartości węglowodorów i węglowej części cząstek stałych oraz drogą pośrednią o temperaturze 52°C z filtrem, na którym zatrzymywane są cząstki stałe – pomiar węglowodorów gazowych. Odpowiedź analizatora FID umieszczonego na grzanej drodze gazowej o temperaturze 191°C, zawiera impulsy sygnału, które są proporcjonalne do koncentracji części węglowej cząstek stałych. Różnica poziomów obu sygnałów jest proporcjonalna do koncentracji frakcji organicznej cząstek stałych. Kalibrację koncentracji węgla i SOF oraz wartości sygnału odpowiedzi metody z zastosowaniem analizatorów FID, dla różnych typów silników przeprowadza się z wykorzystaniem metody grawimetrycznej.



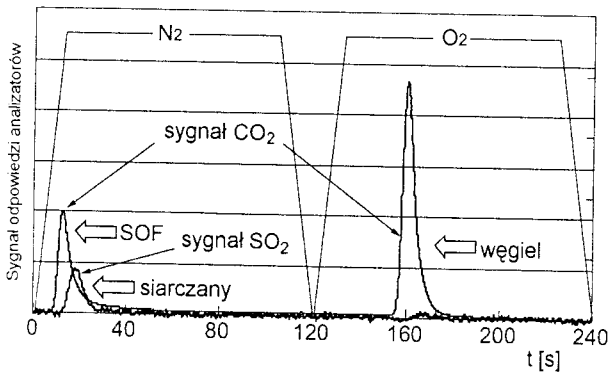
Rys. 19. Schemat metody do pomiaru PM z wykorzystaniem analizatorów FID [9, 14]

5.9. Metoda wysokotemperaturowego utleniania i redukcji polega na pomiarze związków powstałych z utleniania węgla, węglowodorów i siarki. Pomiaru dokonuje się z tunelu rozcieńczającego, podobnie jak w metodzie grawimetrycznej, z tym że filtr teflonowy zastąpiony jest kwarcowym, który nie zmienia właściwości w wysokich temperaturach [7]. Po zebraniu cząstek stałych na filtrze jest on umieszczany w komorze o temperaturze 980°C wypełnionej azotem (rys. 20). W środowisku obojętnym następuje odparowanie frakcji organicznej SOF, a także termiczny rozkład siarczanów. Tlen dostarczany jest do komory w jej środkowej części, gdzie frakcja organiczna utleniana jest do CO_2, a związki siarki do SO_2. Koncentracja dwutlenku węgla i siarki jest mierzona analizatorami niedyspersyjnymi na podczerwień. Po zakończeniu parowania związków wchodzących w skład cząstek stałych, azot jest zastępowany tlenem i następuje utlenianie części węglowej PM. Stężenie powstałego w ten sposób CO_2 jest mierzone omawianym wcześniej analizatorem [27].



Rys. 20. Schemat układu do pomiaru koncentracji CO_2 i SO_2 utlenianych z cząstek stałych [18]

Na rysunku 21 przedstawiono wartości sygnałów z analizatorów CO_2 i SO_2 podczas pomiaru cząstek stałych. Całkowity czas pomiaru wynosi 4 minuty. Koncentracja SOF jest obliczana na podstawie całkowania sygnału z analizatora CO_2 podczas przepływu azotu (0÷120 s). Koncentracja węgla jest obliczana na podstawie całkowania sygnału z analizatora CO_2 podczas przepływu tlenu (120÷240 s). Związki siarki są obliczane przez całkowanie sygnału z analizatora SO_2 podczas całego procesu (0÷240 s). Całkowita masa cząstek stałych jest sumą trzech wymienionych składników [18].



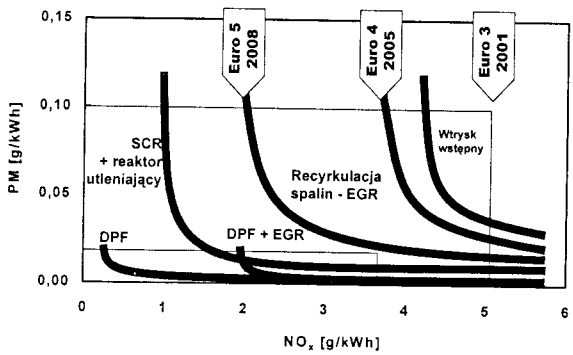
Rys. 21. Zmiany sygnałów z analizatorów CO_2 i SO_2 podczas pomiarów PM [18]

6. PODSUMOWANIE

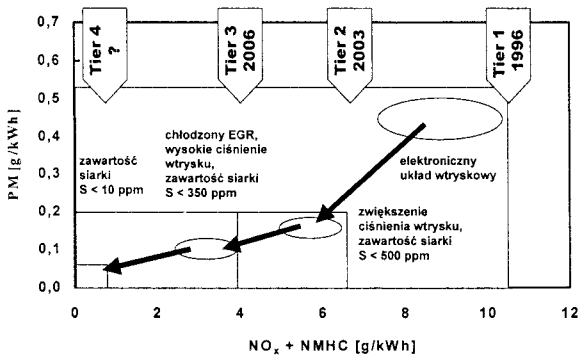
Emisja cząstek stałych to zjawisko występujące głównie w silnikach z zapłonem samoczynnym, jednakże występuje również w nowoczesnych silnikach ZI o bezpośrednim wtrysku paliwa [12, 20]. Na podstawie analiz dotychczas produkowanych silników o zapłonie samoczynnym i perspektyw ich rozwoju można stwierdzić, że nie ma problemów ze spełnieniem norm granicznych CO i HC, natomiast trudniejsze jest spełnienie wymogów ograniczających emisję NO_x. Bariera emisji cząstek stałych stanowi wymogi krytyczne dla tych silników (rys. 22) i dlatego punkt ciężkości badań nad obniżeniem toksyczności silników ZS przesunął się na wyjaśnienie zjawisk związanych z tworzeniem cząstek stałych i możliwościami obniżania ich emisji [1, 13, 15, 17, 19]. Wraz ze zmniejszeniem emisji cząstek stałych z silników należy rozszerzyć prace nad nowymi metodami pomiaru PM z pojazdów niskoemisyjnych, gdyż metoda homologacyjna (grawimetryczna) powoduje znaczne niedokładności w wyznaczaniu bardzo małych ich ilości. Wydaje się, że najbardziej użyteczną jest metoda polegająca na wysokotemperaturowym utlenianiu i redukcji. Pomimo, że metoda ta nie może być stosowana do otrzymywania wyników w czasie rzeczywistym, można za jej pomocą w krótkim czasie poznać skład frakcyjny oraz masę cząstek stałych.

Do analiz poszczególnych składników spalin wykorzystywane są poszczególne cechy fizyczne gazów oraz cząstek stałych. Proces pomiarowy jest utrzymywany w ściśle określonych i wąskich zakresach przepływów, wilgotności, gęstości i ciśnień, a zwłaszcza temperatur. Szczególną uwagę zwraca się na system pobierania próbek spalin z kolektora wylotowego silnika, oczyszczania i przygotowania oraz przesyłania określonych strumieni spalin do analizatorów. Narzucone są precyzyjnie określone czasy utrzymywania silnika w poszczególnych fazach testu i związane z tym okresy zasysania i przepływu próbek spalin oraz analizy i rejestracji wyników. Stosowane jest sterowanie komputerowe z układami skalowania i wewnętrznej kontroli. Następuje integracja układów pomiarowych w duże zautomatyzowane systemy badawczo-obliczeniowe, obejmujące coraz więcej elementów składowych. Celem jest w pełni zautomatyzowane stanowisko badawcze zapewniające poddanie silnika dowolnym cyklom pomiarowym z systemami liczącymi wybrane parametry pracy i emisji, zapewniające wysokie wymagania dokładności i jakości wyników.

a)



b)



Rys. 22. Kierunki redukcji emisji dla pojazdów ciężarowych a) w Europie b) w USA [15, 30]

LITERATURA

[1] *Arcoumanis C. i in.: Real-time Measurement of Particulate Emissions in a Turbo Charged DI Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 922390.*

[2] *AVL Consulting & Information: Current and Future Exhaust Emission Legislation. AVL List GmbH. Graz 06.2002.*

[3] *Bischof O.F., Horn H.-G.: Zwei Online-Messkonzepte zur physikalischen Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Motorabgasen am Beispiel von Dieselemissionen. Motortechnische Zeitschrift nr 4, 1999.*

[4] *Environmental Protection Agency 40 CFR Parts 80 and 86: Control of Diesel Fuel Quality.*

[5] *Franke H.U., Tschöke H., Veit P.: 3D – Morfology of Particles of Soot of Diferent Fuels Depending on the Combustion Proces. World Automotive Congress FISITA, Paris 1998.*

[6] *Franke H.U., Tschöke H.: Influence of Fuels on the Soot-Particle-Goemetry. Otto von Guericke University of Magdeburg, Magdeburg 1998.*

[7] *Fukushima H. i in.: An Alternative Technique for Low Particulate Measurement, SAE Technical Paper Series 2001-01-0218.*

[8] *Fukushima H. i in.: Continuous Measurement of Soot and Soluble Organic Fraction Emission from Advanced Powertrains, FISITA World Automotive Congress, F2000H211.*

[9] *Fukushima H. i in.: Signal Processing and Practical Performance of a Real-time Particulate Analyzer using Fast FIDs. SAE Technical Paper Series 2000-01-1135.*

[10] *Gruber M., Klawatsch D.: Influence of Motor Parameters and Fuel Quality on Particulate Emissions. Vehicle Systems Technology for the Next Century. European Automotive Congress, Barcelona 30.06-2.07.1999.*

[11] *Guenther M. i in.: Advanced Emissions Test Site for Confident PZEV Measurements, SAE Technical Paper Series 2002-01-0046.*

[12] *Hall D.E., Dickens C.J.: Measurement of the Number and Size Distribution of Particles Emitted from a Gasoline Direct Injection Vehicle. SAE Technical Paper Series 1999-01-3530.*

[13] *Herzog P.L., Fraidl G., Prenninger P.: Direct Injection – the Solution for the Future? Motor und Umwelt. AVL List GmbH, Graz 1999.*

[14] *Kawai T. i in. Real-time Aanalysis of Particulate Matter by Flame Ionization Detection. SAE Technical Paper Series 980048.*

[15] *Khair M.K., Lemaire J., Fiscer S.: Achieving Heavy Duty Diesel NOx/PM Levels Below the EPA 2002 Standars... An Integrated Solution. SAE Technical Paper Series 2000-01-0187.*

[16] *Kittelson D. B., Arnold M., Watts W.F.: Review of Diesel Particulate Matter Sampling Methods, Mineapolis 1999.*

[17] *Krieger K.: Diesel-Einspritztechnik für Pkw-Motoren. Überblick über Verfahren und Ergebnisse. Motortechnische Zeitschrift nr 5, 1999.*

[18] *Low PM Analyzer Oxidization & Deoxidization Method. Engine Measurement Division, HORIBA Ltd., 1999.*

[19] *Lüders H., Stommel P.: Diesel Exhaust Treatment–New Approaches to Ultra Low Emission Diesel Vehicles, SAE Technical Paper Series 1999-01-0108.*

[20] *Maricq M.M., Podsiadlik D.H, Brehob D.D., Haghgooie M.: Particulate Emissions from a Direct-Injection Spark-Ignition (DISI) Engine. SAE Technical Paper Series 1999-01-1530.*

[21] *Materiały firm: AVL, Bosch, Horiba, Pierburg.*

[22] *Merkisz J., Pielecha I., Pielecha J.: Uwagi o pośrednich metodach pomiaru emisji cząstek stałych. Archiwum Motoryzacji 1-2. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1999.*

[23] *Merkisz J., Pielecha J.: Specyfika badań homologacyjnych silników spalinowych na hamowni silnikowej. Zeszyty Naukowe Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Samochodów Małolitrażo-wych BOSMAL w Bielsku-Białej. Zeszyt 15. Bielsko-Biała 2002.*

[24] *Merkisz J., Pielecha J.: Zagadnienia emisji cząstek stałych podczas rozruchu silnika ZS: Sympozjum Naukowe SYMROZ'2002. Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych. Szczecin-Kopenhaga 2002.*

[25] *Merkisz J.: Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.*

[26] *Osada H. i in.: Real-time Measurement of Diesel Particulate Emissions by the PAS Method Using CO2 Laser. SAE Technical Paper Series 820461.*

[27] *Real-time Particulate Analyzer MEXA-1220PM. Engine Measurement Division, HORIBA Ltd., 1999.*

[28] *Transient Particulate Analysis Using Tapered Element Oscillating Microbalance TEOM, Engine Measurement Division, HORIBA Ltd., 1999.*

[29] *Wall J.C. i in.: Fuel Composition Effects on Heavy-Duty Diesel Particulate. SAE Technical Paper Series 841364.*

[30] *Walsh M.: Global Trends in Diesel Particulate Control. SAE Technical Paper Series 1999-01-0107.*

[31] *Walsh M.: Global Trends in Motor Vehicle Pollution Control: Accomplishments to Date and Challenges for the New Millennium. World Automotive Congress FISITA, F2000PH02. Seoul 2000.*

[32] *Yamazaki H.i in.: A Study of Simplified Measurement Method for Diesel Particulate. Society of Automotive Engineers of Japan, Preliminary Staff Report 911, 1991.*