

ZAGROŻENIA SPALINAMI SILNIKÓW DIESLA



bat
CIOP  **PIB**

Warszawa 2010

Wytyczne opracowano w ramach PBZ-MEiN 3/2/2006 pt.: „Inżynieria procesów ograniczania emisji oraz utylizacji gazów szkodliwych i cieplarnianych”.

Wydano w ramach I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowywanego w latach 2008-2010 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Główny Koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy

dr Małgorzata Pośniak, dr inż. Elżbieta Jankowska, dr Małgorzata Szewczyńska,
dr Lidia Zapór – Zakład Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych CIOP-PIB

dr inż. Agnieszka Brochocka, dr inż. Piotr Pietrowski – Zakład Ochron Osobistych
CIOP-PIB

Projekt okładki

Jolanta Maj

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2010

ISBN 978-83-7373-081-6



Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, fax (48-22) 623 36 93, 623 36 95, www.ciop.pl

Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Spaliny silników Diesla	6
1.1. Ogólna charakterystyka	6
1.2. Szkodliwość spalin dla zdrowia człowieka	8
2. Kryteria i zasady oceny narażenia zawodowego na spaliny silników Diesla	10
2.1. Ocena narażenia na cząstki stałe – stan aktualny	10
2.2. Ocena narażenia na cząstki stałe – na podstawie analizy wyników badań	11
3. Metody badania parametrów fizykochemicznych spalin silników Diesla oraz przykładowe wyniki badań	13
3.1. Stężenie masowe frakcji spalin – metoda filtracyjno-wagowa	13
3.1.1. Metoda badania	13
3.1.2. Przykładowe wyniki badań	16
3.2. Stężenia i rozkłady wymiarowe cząstek spalin – metody optyczne	17
3.2.1. Metody badania	17
3.2.2. Przykładowe wyniki badań	21
3.3. Badanie niebezpiecznych substancji chemicznych (we frakcjach drobnych spalin silników Diesla)	26
3.3.1. Metody badania	26
3.3.2. Przykładowe wyniki badań	29
4. Ograniczanie narażenia na spaliny silników Diesla	30
4.1. Środki ochrony zbiorowej – wentylacja i klimatyzacja	30
4.1.1. Wymagania	30
4.1.2. Kontrola działania instalacji wentylacji i klimatyzacji na zgodność z wymaganiami	34
4.1.3. Kontrola instalacji wentylacji i klimatyzacji w warunkach użytkowania	35
4.1.4. Układy do oczyszczania powietrza	36

4.2. Środki ochrony indywidualnej – sprzęt ochrony dróg oddechowych	37
4.2.1. Kryteria i zasady doboru	37
4.2.2. Zasady oceny właściwości ochronnych	45
4.3. Środki ochrony zawierające struktury filtracyjno-sorpcyjne	46
5. Podsumowanie	49
6. Definicje	50
7. Piśmiennictwo	53

Pierwszy silnik wysokoprężny, w którym spalany jest ciężki olej napędowy, został skonstruowany przez niemieckiego inżyniera Rudolfa Diesla w 1897 roku.

Obecnie silniki Diesla są używane prawie we wszystkich pojazdach przemysłowych i w rosnącej liczbie samochodów, co wynika głównie z niskich kosztów eksploatacji. Niestety, silniki te są źródłem spalin niebezpiecznych dla zdrowia człowieka i środowiska naturalnego.

Narażenie zawodowe na substancje chemiczne i cząstki stałe wchodzące w skład spalin emitowanych przez silniki wysokoprężne Diesla dotyczy osób obsługujących lub konserwujących sprzęt wyposażony w tego typu silniki. Są to przede wszystkim kierowcy samochodów, pracownicy zajezdni autobusowych i zakładów zajmujących się naprawą i serwisem samochodów, pracownicy kolei, operatorzy dźwigów, wózków widłowych i podnośników, a także górnicy oraz strażacy.

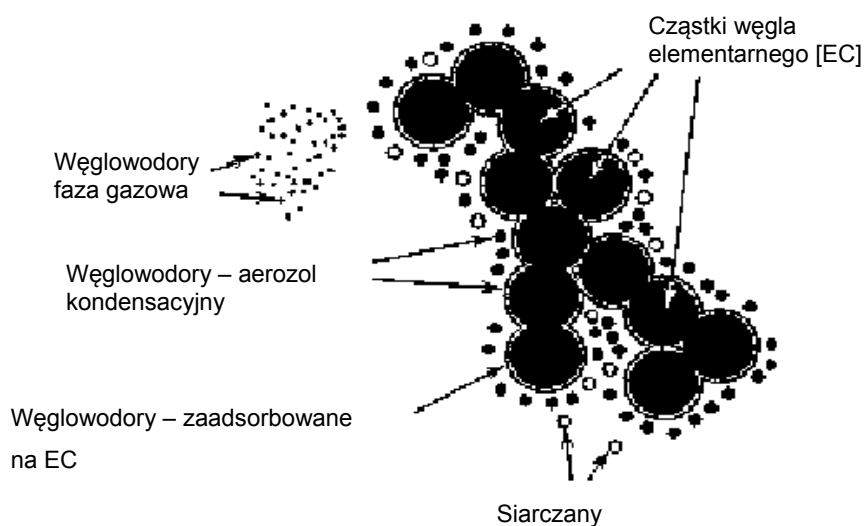
Ze względu na powszechność stosowania silników Diesla w pojazdach transportu, a także samochodach osobowych, spaliny tych silników stanowią zagrożenie dla zdrowia ogółu populacji.

1. Spaliny silników Diesla

1.1. Ogólna charakterystyka

Spaliny silników Diesla są to wieloskładnikowe mieszaniny kilkuset związków chemicznych, powstające w wyniku niedoskonałego spalania oleju napędowego, a także zawartych w nich modyfikatorów i zanieczyszczeń. Te niepożądane produkty spalania wydzielają się do atmosfery w postaci gazów i par, jak również w postaci cząstek stałych. W skład fazy gazowej wchodzi węglowodory alifatyczne i ich nitrowe pochodne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne o niskim ciężarze cząsteczkowym, takie jak naftalen, acenaftalen, antracen, fluoren i fluoranten. Tlenki azotu (produkty uboczne spalania) i tlenek węgla (produkt niezupełnego spalania) – to główne gazowe składniki spalin silników Diesla.

Emisja cząstek stałych o różnych wymiarach i kształcie jest zjawiskiem charakterystycznym dla silników Diesla [4, 6, 9, 12, 13]. Na wielkość emisji tych cząstek ma wpływ wiele czynników, między innymi zawartość siarki w paliwie, liczba cetanowa oraz gęstość paliwa. Węgiel elementarny (pierwiastkowy) jest głównym składnikiem cząstek stałych, na których powierzchni są zaadsorbowane związki organiczne i nieorganiczne, głównie siarczany (rys. 1.).



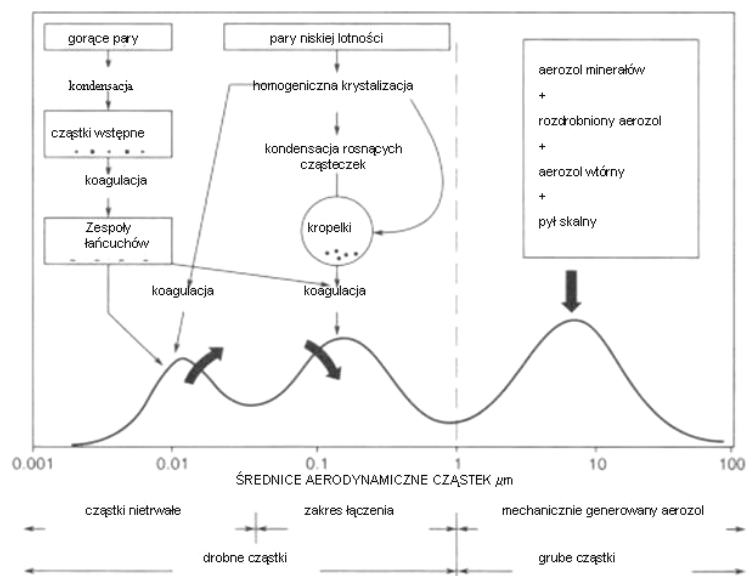
Rys. 1. Schemat cząstek spalin silników Diesla [4]

W skład organicznej frakcji rozpuszczalnej, stanowiącej około 15-45% masy cząstek stałych, wchodzi frakcje:

- parafinowa: mieszanina węglowodorów alifatycznych $C_5 - C_{40}$,
- aromatyczna: mieszanina węglowodorów aromatycznych, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i ich pochodnych, octanów, aldehydów,
- kwasowa: mieszanina fenolu i jego pochodnych,
- zasadowa: anilina i jej pochodne, pirydyna i jej pochodne,
- przejściowa: dioksan, metoksyfenantren.

Frakcja nierozpuszczalna poza węglem zawiera również związki siarki, metale oraz wodę związaną z siarczanami.

Proporcje między węglem pochodzenia organicznego i nieorganicznego w spalinach zależą od bardzo wielu czynników, a przede wszystkim od rodzaju oleju napędowego, typu silnika, trwania cyklu spalania, stanu technicznego silnika, sposobu pracy operatora/kierowcy oraz zastosowanych urządzeń ograniczających emisję. Z reguły węgiel elementarny stanowi większą część masy cząstek stałych spalin silników Diesla, niż rozpuszczalna frakcja organiczna [12].



Rys. 2. Schemat powstawania cząstek spalin silników Diesla [4]

Cząstki zawarte w spalinach silników Diesla stanowią aerozol polidispersyjny. Rysunek 2. przedstawia mechanizmy powstawania tego aerozolu [4]. W fazie po-

czątkowej powstają drobnodispersyjne aerozole spalania o wielkości cząstek od 0,001 do 0,8 μm . Cząstki te w wyniku procesów kondensacji i koagulacji przechodzą z formy cząsteczkowej w formę zakumulowaną, która zawiera ponad 90% cząstek o średnicy aerodynamicznej do 1,0 μm (średnia wartość – 0,2 μm) [6].

1.2. Szkodliwość spalin dla zdrowia człowieka

Spaliny silnika Diesla (DEP) są przyczyną zarówno ostrych, jak i przewlekłych szkodliwych zmian w układzie oddechowym, głównie w postaci astmy oraz w układzie sercowo-naczyniowym. Są też czynnikiem mutagennym i rakotwórczym – grupa 2A wg Międzynarodowej Organizacji Badań nad Rakiem [7]. W literaturze najwięcej danych potwierdza zależność między występowaniem nowotworów złośliwych płuc a narażeniem na te spaliny.

Prawdopodobnie główną przyczyną nowotworów płuc, przede wszystkim gruczolaków i gruczolakoraków, są przedostające się do strefy wymiany gazowej płuc submikronowe cząstki stałe spalin, na których powierzchni są zaadsorbowane substancje chemiczne, m.in. mutagenne i rakotwórcze, w tym wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i ich nitrowe pochodne rozpuszczalne w rozpuszczalnikach organicznych oraz lipidowych składnikach surfaktantów płucnych ssaków. Cząstki te łatwo się wchłaniają i gromadzą w pęcherzykach płucnych. W piśmiennictwie zostały również przedstawione badania epidemiologiczne, których wyniki wskazują na statystycznie istotne zwiększenie występowania u osób narażonych na spaliny silników Diesla raka pęcherza, raka okrężnicy, odbytnicy i żołądka oraz szpiczaka mnogiego i mięsaka siateczkowo-komórkowego.

Badania toksykologiczne potwierdzają rakotwórcze działanie węgla elementarnego zawartego w spalinach silników Diesla. Jednocześnie nie można wykluczyć, że związki chemiczne wchodzące w skład tych spalin, a przede wszystkim wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i ich nitrowe pochodne, oddziałują szkodliwie na pracowników zawodowo narażonych na spaliny silników Diesla.

Na toksyczność DEP wpływa szereg czynników: skład chemiczny i reaktywność zaadsorbowanych substancji chemicznych, stopień dyspersji, stan agregacji oraz wielkość cząstek. Mały wymiar cząstek i duża powierzchnia wchłaniania umożliwiają wnikanie cząstek głęboko do płuc, gdzie są deponowane, a następnie mogą wnikać do krwi oraz do układu nerwowego [10].

Mechanizm działania cząstek spalin silników Diesla nie jest wyjaśniony. Wiadomo, że DEP indukują reakcje zapalne w drogach oddechowych. Reakcje proza-

palne obserwowano zarówno w komórkach nabłonka płuc, jak i w makrofagach płucnych. Cząstki DEP powodują zaburzenia metabolizmu tlenowego w komórkach, prowadząc do tworzenia wolnych rodników tlenowych i powstawania tzw. stresu oksydacyjnego w komórce. Stres oksydacyjny i reakcje zapalne są wyrazem uszkodzenia komórki, którego następstwem może być destrukcja DNA prowadząca do mutacji komórki, a w efekcie do jej transformacji nowotworowej [2,15].

Działanie spalin silników Diesla jest ściśle zależne od dawki, czyli od ilości cząstek wchłoniętych do komórek na drodze fagocytozy oraz od wielkości cząstek. Generalnie uważa się, że efekt toksyczny DEP jest związany z cząstkami o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 10 μm (PM_{10}). Zdaniem wielu autorów szczególnie cząstki o średnicy poniżej 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) są odpowiedzialne za nieodwracalne zmiany w drogach oddechowych. Jednak ostatnie doniesienia wskazują, że to cząstki mniejsze, o średnicy do 0,2 μm , powodują stres oksydacyjny i reakcje zapalne [3,10,17].

Badania toksycznego działania cząstek spalin silników Diesla prowadzone w ramach zadania VII.2 projektu PBZ-MEiN 3/2/2006 na komórkach nabłonka pęcherzyków płucnych II rzędu człowieka (A549) oraz na komórkach jajnika chomika chińskiego (CHO) wykazały, że za cytotoksyczne działanie cząstek spalin silników Diesla odpowiedzialna jest frakcja o najmniejszym badanym wymiarze cząstek, tj. $\text{PM}_{0,25}$.

W większości opublikowanych wyników badań zaznacza się, że toksyczność nierozpuszczalnych cząstek o podobnej budowie wzrasta odwrotnie proporcjonalnie do średnicy cząstki i proporcjonalnie do powierzchni cząstki [19]. Zwłaszcza cząstki o wymiarze rzędu nano budzą obawy, z uwagi na fakt, że mogą swobodnie przenikać przez błony komórkowe i migrować w organizmie do różnych narządów, ulegać w nich depozycji i wywoływać szkodliwe skutki zdrowotne. W badaniach *in vitro* wykazano, że ultradrobne cząstki spalin silników Diesla powodują stres oksydacyjny w komórkach nabłonkowych naczyń krwionośnych [10]. Należy zatem przypuszczać, że liczba cząstek ultradrobnych może decydować o toksyczności spalin silników Diesla. Jest to tym groźniejsze, że zmiany technologii produkcji silników spalinowych zmierzają do ograniczania emisji spalin, ale nie ograniczają, a wręcz powodują wzrost udziału frakcji ultradrobnych cząstek w spalinach [5].

2. Kryteria i zasady oceny narażenia zawodowego na spaliny silników Diesla

2.1. Ocena narażenia na cząstki stałe – stan aktualny

Ocena narażenia zawodowego związanego z występowaniem w powietrzu na stanowisku pracy cząstek stałych pochodzących ze spalin silników Diesla jest procesem złożonym. Wymaga co najmniej:

- pobrania próbek powietrza zawierających cząstki stałe spalin silników Diesla,
- określenia stężeń cząstek zawartych we frakcji respirabilnej pyłu,
- obliczenia wskaźnika narażenia na cząstki w odniesieniu do całodziennego czasu pracy,
- porównania uzyskanej wartości wskaźnika narażenia z wartością dopuszczalnego lub zalecaną stężenia.

Pobieranie próbek powietrza w celu określenia stężenia frakcji respirabilnej cząstek spalin silników Diesla może być wykonane za pomocą przyrządów stacjonarnych (pobieranie próbki w określonym stałym punkcie środowiska pracy) lub za pomocą przyrządów indywidualnych, zainstalowanych na pracowniku i wyposażonych w głowicę pomiarową usytuowaną w strefie oddychania (możliwie blisko dróg oddechowych pracownika). Dozymetria indywidualna jest oczywiście metodą preferowaną, gdyż najbardziej odzwierciedla narażenie pracowników na szkodliwe działanie pyłów podczas całego dnia pracy. Zasady pobierania próbek powietrza w środowisku pracy oraz interpretacji uzyskanych wyników są określone w normie PN-Z-04008-7:2002 i PN-Z-04008-7:2002/Az1:2004 [43]. Strategia pomiarowa i wytyczne do oceny narażenia na pyły są podane w normie PN-EN 689:2002 [34].

W celu oceny narażenia na cząstki stałe spalin silników Diesla występujących na stanowiskach pracy wykonuje się pomiary stężeń pyłu respirabilnego w pobranych próbkach z wykorzystaniem metody filtracyjno-wagowej PN-91/Z-04030/06 [45]. Zgodnie z definicją przedstawioną w rozporządzeniu [24] za pył respirabilny uważa się zbiór cząstek przechodzących przez selektor wstępny o charakterystyce przepuszczalności wg wymiarów cząstek, opisanej logarytmiczno-normalną funkcją prawdopodobieństwa ze średnią wartością średnicy aerodynamicznej $3,5 \pm 0,3 \mu\text{m}$ i z odchyleniem standardowym $1,5 \pm 0,1$.

Określone w ciągu całego dnia pracy wartości stężeń frakcji respirabilnej cząstek spalin silników Diesla stanowią podstawę do obliczenia wskaźnika narażenia na te cząstki, który jest porównywany z wartością najwyższego dopuszczalnego stężenia (NDS). Aktualnie w Polsce jest określona wartość NDS cząstek stałych spalin silników Diesla w środowisku pracy dla pyłu respirabilnego. Wynosi ona $0,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ [24] i jest stosowana w procesie oceny narażenia zawodowego pracowników zatrudnionych w środowisku, w którym występują w powietrzu cząstki stałe zawarte w spalinach silników Diesla.

2.2. Ocena narażenia na cząstki stałe – na podstawie analizy wyników badań

W przypadku badania narażenia na cząstki ultradrobne, takie jak cząstki stałe emitowane podczas spalania oleju napędowego w silnikach Diesla, istotnymi parametrami cząstek, oprócz stężeń masowych określonych metodą filtracyjno-wagową, są między innymi ich rozkłady wymiarowe, stężenie liczbowe i powierzchnia. Wiedza na ten temat jest szczególnie ważna z uwagi na fakt, że szkodliwe działanie na organizm człowieka cząstek ultradrobnych może mieć inny charakter niż działanie cząstek o większych wymiarach, które są w procesie oddychania zatrzymywane przede wszystkim w pęcherzykach płucnych. Cząstki ultradrobne mogą przenikać do krwi i w konsekwencji ulegać przemieszczeniu do różnych organów wewnętrznych człowieka, wywołując negatywne efekty zdrowotne. Szczególnie dotyczy to cząstek ultradrobnych o wymiarach poniżej 100 nm, które są uważane za bardzo niebezpieczne dla zdrowia człowieka.

Uwzględniając powyższe, należy przyjąć, że ocena narażenia na cząstki emitowane podczas spalania oleju napędowego w silniku Diesla powinna być prowadzona w sposób kompleksowy i obejmować zarówno analizę stężeń masowych określonych metodą filtracyjno-wagową, jak również analizę rozkładów wymiarowych cząstek oraz ich stężeń liczbowych i powierzchni cząstek. Wyniki badań stężeń masowych metodą filtracyjno-wagową dostarczą informacji o masie cząstek przedostających się w obszar pęcherzyków płucnych człowieka, natomiast wyniki badań pozostałych parametrów cząstek będą podstawą do scharakteryzowania cząstek pod kątem możliwości ich przenikania do krwi (rozkład wymiarowy i stężenie liczbowe) oraz możliwości zaadsorbowania znacznych ilości substancji niebezpiecznych zawartych w spalinach silników Diesla (powierzchnia cząstek). Nale-

ży jednak podkreślić, że podstawą metod stosowanych do oznaczania rozkładów wymiarowych, stężeń liczbowych oraz powierzchni cząstek z reguły nie są pomiary w odniesieniu do średnicy aerodynamicznej cząstek, która jest najbardziej istotna z uwagi na ocenę procesu osadzania się cząstek w układzie oddechowym człowieka. Niemniej uzyskiwane wyniki dostarczają bardzo istotnych informacji dotyczących charakterystyki cząstek w momencie ich rzeczywistej emisji oraz zmienności tej emisji w czasie, obrazując rzeczywiste narażenie pracownika na cząstki spalin silników Diesla.

W wyniku badań przeprowadzonych w CIOP-PIB stwierdzono, że podczas całodziennego narażenia na spaliny silników Diesla pracownik może być narażony na zmienne ilości cząstek ultradrobnych (porównaj rys. 15.) i cząstek drobnych (porównaj rys. 16.), z reguły o wymiarach poniżej 1000 nm. Stwierdzono również, że najwięcej jest emitowanych cząstek o wymiarach poniżej 100 nm (porównaj rys. 14. i 20.).

W związku z powyższym **ocena narażenia na cząstki spalin silników Diesla powinna obejmować analizę następujących danych:**

- stężeń masowych cząstek spalin o wymiarach poniżej 1000 nm – metodą filtracyjno-wagową,
- stężeń liczbowych i powierzchni cząstek o wymiarach poniżej 1000 nm, ze szczególną analizą w odniesieniu do cząstek o wymiarach poniżej 100 nm – metodami optycznymi,
- zawartości węgla elementarnego w cząstkach spalin o wymiarach poniżej 1000 nm – zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 14530: 2005 [40],
- zawartości wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w cząstkach spalin o wymiarach poniżej 1000 nm – zgodnie z zaleceniami normy PN-Z-04240-5:2006 [46].

3. Metody badania parametrów fizykochemicznych spalin silników Diesla oraz przykładowe wyniki badań

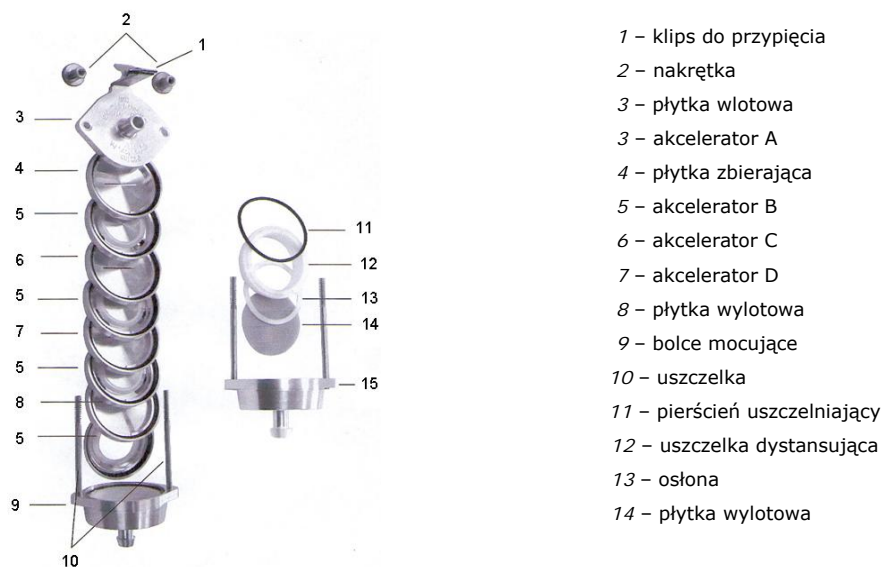
3.1. Stężenie masowe frakcji cząstek spalin – metoda filtracyjno-wagowa

3.1.1. Metoda badania

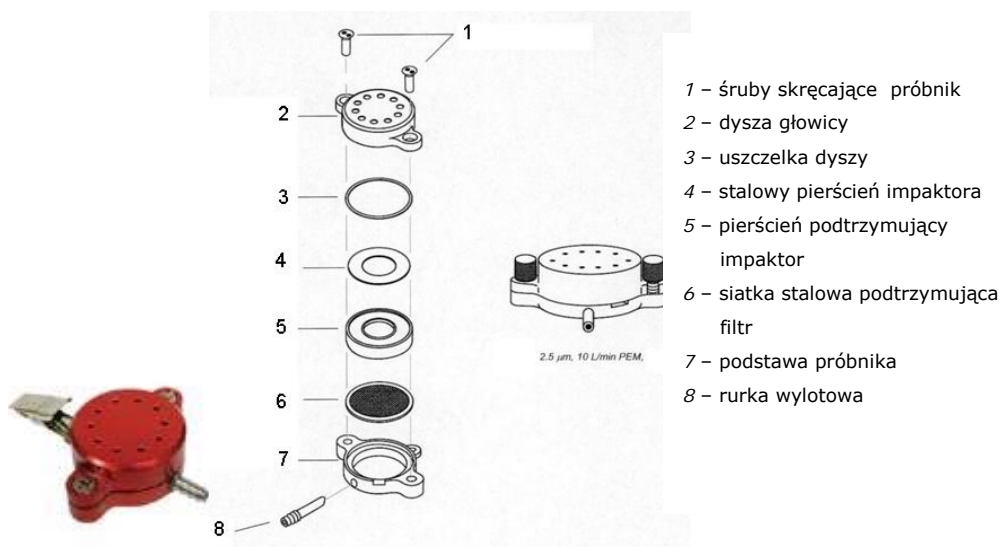
Do pobierania i oznaczania stężeń masowych cząstek stałych zawartych w spalinach silników Diesla mogą być stosowane:

- próbniki typu PCIS – Sioutas Personal Cascade Impactor (rys. 3.) – oznaczanie frakcji spalin PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 , $PM_{0,5}$, $PM_{0,25}$,
- próbniki typu PEM – Personal Environmental Monitor – oznaczanie frakcji PM_{10} , $PM_{2,5}$ (rys. 4.),

które wymagają stosowania pompki, umożliwiających pobieranie próbek ze strumieniem objętości $9-10 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, np. pompki SKC 100-3000 (rys. 5.).

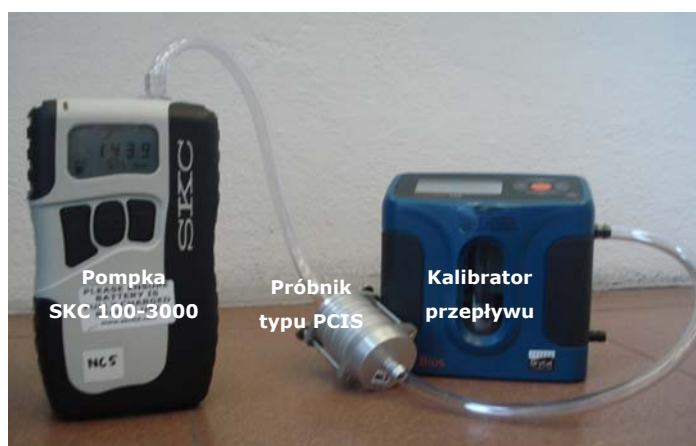


Rys. 3. Próbnik typu PCIS [<http://www.skinc.com>]



Rys. 4. Próbnik typu PEM [<http://www.skinc.com>]

Metoda filtracyjno-wagowa do określania stężeń frakcji PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 , $PM_{0,5}$ i $PM_{0,25}$ cząstek emitowanych w procesie spalania olejów napędowych w silnikach Diesla polega na zassaniu powietrza zawierającego spaliny z zadaniem strumieniem objętości w określonym czasie i wydzieleniu cząstek frakcji stałych na filtrach znajdujących się w próbnikach pomiarowych, np. typu PCIS (rys. 6.) lub PEM.



Rys. 5. Układ do kalibracji przepływu powietrza przez system do pobierania frakcji cząstek stałych zawartych w spalinach silników Diesla



Rys. 6. Próbnik typu PCIS wraz z filtrami przed pobraniem próbek frakcji cząstek stałych zawartych w spalinach silników Diesla

Każdorazowo przed przeprowadzeniem pomiaru należy przeprowadzić regulację strumienia objętości powietrza zasysanego przez pompkę z wykorzystaniem systemu kalibracyjnego (rys. 5.).

Przed pomiarem filtry powinny być kondycjonowane do czasu uzyskania ich stałej masy, a następnie ważone z zastosowaniem mikrowagi z dokładnością do $\pm 0,0005$ mg [<http://www.skinc.com>]. Próbniki z filtrami powinny być podłączone do pompek giętkimi rurkami. Podczas pomiarów należy kontrolować strumień pobieranego powietrza ze spalinami silników Diesla oraz czas ich pobierania. Filtry z pobranymi frakcjami cząstek (rys. 7.) powinny być również kondycjonowane do stałej masy, a następnie ważone.



Rys. 7. Filtry z pobranymi próbkami frakcji stałych spalin silników Diesla

Stężenia masowe (C_m) mierzonych frakcji cząstek stałych zawartych w spalinach silników Diesla należy obliczać jako stosunek mas frakcji cząstek zatrzymanych na odpowiednich filtrach do objętości zassanego powietrza, korzystając ze wzoru:

$$C_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \times 1000$$

gdzie:

m_2 – masa filtru po pobraniu próbki, mg,

m_1 – masa filtru przed pobraniem próbki, mg,

V – objętość próbki spalin, obliczona jako iloczyn strumienia objętości pobieranych spalin i czasu pobierania, dm^3 .

3.1.2. Przykładowe wyniki badań

Badania stężeń frakcji PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1 , $\text{PM}_{0,5}$ i $\text{PM}_{0,25}$ w garażu przeprowadzono metodą filtracyjno-wagową z użyciem pompki SKC 100-3000 z próbnikami PCIS oraz PEM [18]. Próbki pobierano w odległości 0,5 m od wylotu rury wydechowej włączonego silnika Skody Fabii TDI (rys. 8.).



Rys. 8. Silnik Diesla do generowania spalin wraz z aparaturą do pobierania próbek frakcji stałej spalin

Przykładowe wyniki badań stężenia masowego cząstek stałych spalin silników Diesla oznaczonych metodą filtracyjno-wagową przedstawiono w tabeli 1. Z da-

nych tych wynika, że cząstki o wymiarach poniżej 0,25 μm stanowią średnio ok. 75% cząstek spalin silników Diesla.

Tabela 1. Stężenie masowe frakcji $\text{PM}_{0,25}$, $\text{PM}_{2,5}$, i PM_{10}

Próbnik	<i>N</i>	Objętość powietrza dm^3	Frakcja	Stężenie $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
PCIS	26	405 ÷ 2313	$\text{PM}_{0,25}$	0,21 ÷ 1,31
PEM	20	495 ÷ 2223	PM_{10}	0,39 ÷ 1,45
PEM	22	315 ÷ 2313	$\text{PM}_{2,5}$	0,20 ÷ 1,35

3.2. Stężenia i rozkłady wymiarowe cząstek spalin – metody optyczne

3.2.1. Metody badania

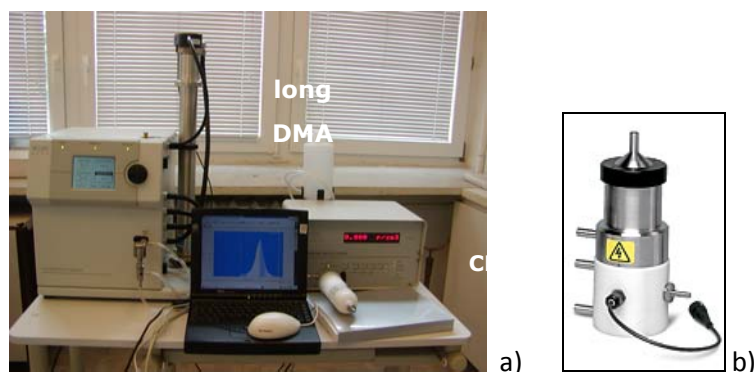
Z uwagi na fakt, że w trakcie oceny narażenia na cząstki ultradrobne zawarte w spalinach silników Diesla istotne znaczenie mogą mieć informacje o różnych parametrach fizycznych cząstek (stężeniach masowych, stężeniach liczbowych, powierzchni cząstek oraz ich rozkładach wymiarowych) metoda badań powinna uwzględniać kompleksowe podejście do tego zagadnienia [11]. Opracowana metoda jest ukierunkowana na określenie:

- stężenia liczbowego, powierzchni, stężenia masowego i rozkładu wymiarowego cząstek z zakresu od 5 do 661 nm, z użyciem systemu analizy wymiarowej cząstek SMPS (TSI -CPC 3022A, DMA: 3080L i 3085),
- stężenia liczbowego oraz rozkładu wymiarowego cząstek z zakresu od 300 do 10 000 nm, z użyciem licznika optycznego GRIMM Dust Monitor 1.108,
- stężenia liczbowego cząstek z zakresu od 20 do 1 000 nm, z zastosowaniem kondensacyjnego licznika cząstek drobnych P-TRAK (TSI 8525),
- stężenia masowego cząstek z zakresu od 100 do 10 000 nm, z użyciem fotometru DUST TRAK Aerosol Monitor (TSI 8520),
- powierzchni cząstek z zakresu od 10 do 1000 nm, z użyciem przyrządu AERO-TRAK 9000 (TSI).

Stężenia i rozkład wymiarowy cząstek – SMPS

Stężenie liczbowe, stężenie powierzchniowe i stężenie masowe oraz rozkład wymiarowy cząstek od 5 do 661 nm mogą być określane z zastosowaniem syste-

mu analizy wymiarowej cząstek – SMPS (rys. 9), zawierającego licznik kondensacyjny CPC, TSI model 3022A oraz analizatory ruchliwości elektrycznej cząstek DMA – model 3080L lub nano DMA model 3085.



Rys. 9. System analizy wymiarowej cząstek (SMPS): a) SMPS z long DMA, b) nano DMA

Kondensacyjny licznik CPC umożliwia pomiar stężenia liczbowego do 10^7 cząstek·cm⁻³. Dokładność zliczania licznika wynosi $\pm 10\%$ dla stężeń do $5 \cdot 10^5$ cząstek·cm⁻³ i $\pm 20\%$ dla stężeń od $5 \cdot 10^5$ do 10^7 cząstek·cm⁻³. Licznik (CPC) umożliwia jedynie zliczanie cząstek bez odnoszenia określanych stężeń liczbowych do ich wymiarów. W analizatorze ruchliwości elektrycznej cząstek DMA, cząstki są klasyfikowane według ich elektrycznej ruchliwości, która jest funkcją wymiaru cząstki i liczby ładunków elektrycznych na niej zdeponowanych. Analizatory ruchliwości elektrycznej cząstek (DMA) w zależności od ich konstrukcji (long DMA czy nano DMA) oraz strumienia objętości powietrza ($0,3 \div 1,5$ dm³·min⁻¹) umożliwiają klasyfikację cząstek w zakresie od 5 do 661 nm. Odchylenie standardowe (quasi) monodispersyjnych aerozoli otrzymanych z użyciem DMA jest mniejsze od 1,3.

Każdorazowo po uruchomieniu systemu SMPS oraz przed każdym pomiarem należy sprawdzać zliczenia zerowe licznika CPC. W czasie pomiaru na wyświetlaczu licznika CPC oraz na komputerze należy kontrolować aktualne wartości stężenia liczbowego mierzonych cząstek. Dane są zapisywane w pamięci przyrządu i mogą być analizowane z użyciem programu komputerowego AIM TSI.

Stężenie i rozkład wymiarowy cząstek – GRIMM

Stężenie liczbowe oraz rozkład wymiarowy cząstek z zakresu od 300 do 10000 nm mogą być określane z zastosowaniem licznika optycznego GRIMM Dust Monitor model 1.108 (rys. 10).



Rys. 10. Licznik optyczny GRIMM Dust Monitor model 1.108

Licznik ten umożliwia pomiar stężenia liczbowego do $2 \cdot 10^6$ cząstek·dm⁻³ przy niedokładności $\pm 2\%$, dla piętnastu frakcji wymiarowych z zakresu 300 ÷ 20 000 nm. Licznik GRIMM działa na zasadzie rozproszenia strumienia światła laserowego przy przepływie zanieczyszczonego powietrza przez komorę pomiarową. Wielkość i charakterystyka rozproszenia klasyfikowana jest przez analizator drgań wysokiej częstotliwości, co umożliwia określenie liczby i wielkości cząstek.

Każdorazowo po uruchomieniu licznika jest przeprowadzana automatyczna kalibracja przyrządu. Pomiary są wykonywane przy strumieniu objętości powietrza równym 1,2 dm³·min⁻¹. W czasie pomiaru na wyświetlaczu licznika należy kontrolować aktualne wartości stężenia liczbowego dla dwóch wybranych przedziałów średnic cząstek. Wyniki pomiarów są gromadzone na magnetycznej karcie pamięci i mogą być transmitowane do komputera za pomocą czytnika kart, w który jest wyposażony przyrząd.

Stężenie liczbowe cząstek – P-TRAK

Stężenie liczbowe cząstek z zakresu od 20 do 1 000 nm może być określane z zastosowaniem licznika kondensacyjnego P-TRAK Ultrafine Particle Counter, TSI model 8525 (rys. 11).



Rys. 11. Kondensacyjny licznik cząstek P-TRAK Ultrafine Particle Counter, TSI model 8525

P-TRAK umożliwia określenie stężenia liczbowego do $5 \cdot 10^5$ cząstek·cm³ przy niedokładności $\pm 5\%$. Zasada działania licznika opiera się na zjawisku kondensacji par alkoholu izopropylowego na cząstkach, dzięki czemu przekształcają się one w większe cząstki, na których następuje rozpraszanie światła laserowego. Wytworzone impulsy światła wykrywane są przez fotodetektor i zliczane w celu określenia stężenia liczbowego cząstek. Strumień objętości badanej próbki powietrza wynosi 100 cm³·min⁻¹.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy w liczniku zamocować kasetę z knotem nasączonym alkoholem izopropylowym oraz układ wlotowy, w którym jest umieszczany filtr wlotowy zapobiegający przedostawaniu się do układu pomiarowego większych cząstek. Każdorazowo po uruchomieniu licznika należy sprawdzać jego wskazania zerowe. Wyniki pomiarów są rejestrowane w pamięci licznika. Dane są analizowane z użyciem programu TRAKPRO3.20 po wprowadzeniu do pamięci komputera.

Stężenie masowe cząstek – DUST-TRAK

Stężenie masowe cząstek z zakresu od 100 do 10 000 nm może być określane z zastosowaniem fotometru DUST-TRAK Aerosol Monitor, TSI model 8520 (rys. 12.).



Rys. 12. Fotometr DUST-TRAK Aerosol Monitor, TSI model 8520

Zasada działania fotometru jest oparta na zjawisku rozproszenia światła laserowego na cząstkach zawieszonych w powietrzu zasysanym do miernika. Konstrukcja fotometru umożliwia pomiar aktualnego stężenia masowego cząstek w zakresie od 0,001 do 100 mg·m⁻³ $\pm 1\%$, przy strumieniu objętości powietrza zasysanego do fotometru ustawionym w zakresie 1,4 ÷ 2,4 dm³·min⁻¹. Pomiar można przeprowadzać dla frakcji cząstek 100 ÷ 10 000 nm lub dla frakcji 100 ÷ 4 000 nm – po zastosowaniu selektora wstępnego.

Po każdym uruchomieniu fotometru należy wykonać regulację jego wskazania zerowego oraz ustawić wymagany strumień objętości powietrza zasysanego przez

fotometr. Na ekranie fotometru DUST-TRAK należy kontrolować wartości aktualnie mierzonego stężenia masowego. Wyniki pomiarów są rejestrowane w pamięci fotometru. Dane są analizowane z użyciem programu TRAKPRO3.20 po wprowadzeniu do pamięci komputera.

Powierzchnia cząstek – AERO-TRAK

Powierzchnia cząstek od 10 do 1 000 nm może być określana z użyciem miernika AERO-TRAK 9000 Nanoparticle Aerosol Monitor, TSI (rys. 13.).



Rys. 13. Miernik cząstek AERO-TRAK 9000 Nanoparticle Aerosol Monitor, TSI

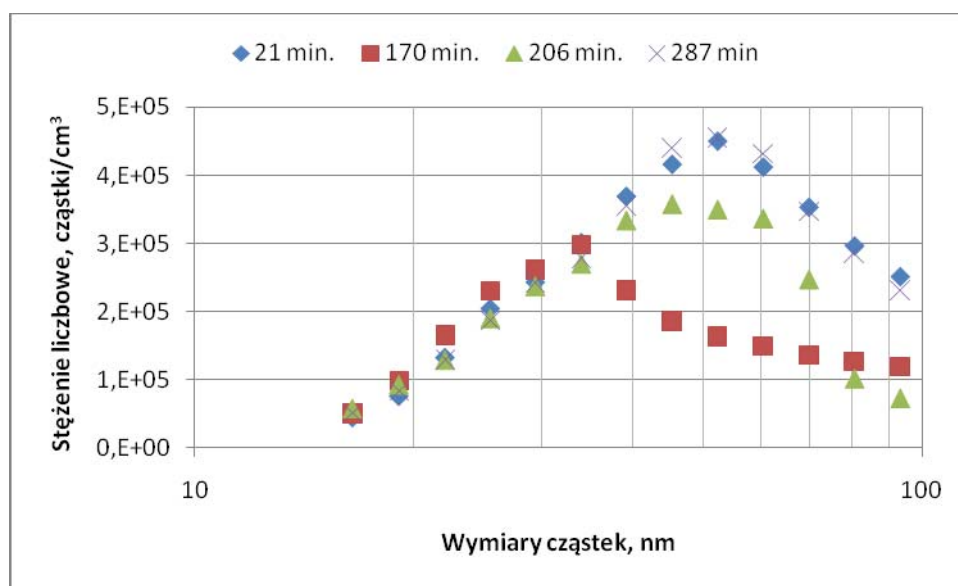
Miernik cząstek AERO-TRAK umożliwia określanie powierzchni cząstek w odniesieniu do ich dwóch frakcji wymiarowych, tzn. frakcji tchawiczno-oskrzelowej, wnikażącej głębiej poprzez krtań, lecz niedostającej się aż do bezrzęskowych dróg oddechowych (TB-Tracheobronchial) i frakcji przenikającej do pęcherzyków płucnych (A-Alveolar). Przyrząd umożliwia pomiar powierzchni cząstek odpowiednio dla frakcji TB od 1 do 2 500 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-3}$, natomiast frakcji A od 1 do 10 000 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-3}$. Dokładność pomiaru dla obydwu frakcji dla cząstek od 20 do 200 nm wynosi $\pm 20\%$.

Powietrze zawierające spaliny silników Diesla należy zasysać do miernika poprzez cyklon, który umożliwia oddzielenie frakcji o wymiarach większych od 1 μm przed wprowadzeniem badanej próbki do przyrządu. Wyniki pomiarów są rejestrowane w pamięci miernika AERO-TRAK i analizowane z użyciem programu komputerowego.

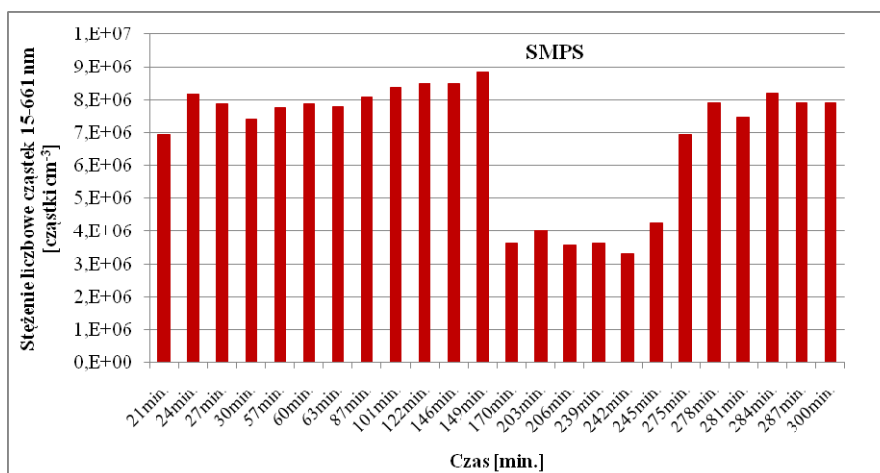
3.2.2. Przykładowe wyniki badań

Stężenia i rozkłady wymiarowe cząstek w powietrzu w garażu monitorowano w czasie, kiedy silnik Diesla był włączony, w celu zbadania zmienności tych parametrów w zależności od czasu, który upłynął od włączenia silnika w danym dniu pracy.

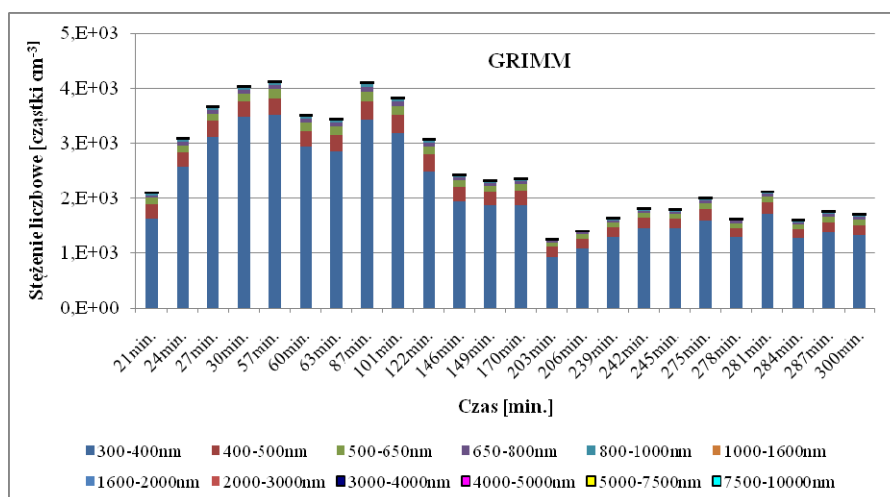
Na rysunkach 14 ÷ 16 przedstawiono przykładowe wyniki badań wykonanych z zastosowaniem SMPS i GRIMM, czyli przyrządów umożliwiających określenie zarówno stężeń liczbowych, jak i rozkładów wymiarowych cząstek. Stwierdzono, że rozkład wymiarowy cząstek drobnych, które są charakterystyczne dla spalin silników Diesla, może ulegać znacznym zmianom w czasie w ciągu dnia, co zobrażowano na rysunku 14. (pomiary SMPS). Zmiany te można również zaobserwować analizując dane zobrażowane na rysunkach 15. i 16., przedstawiających stężenia liczbowe cząstek w funkcji czasu, który upłynął od włączenia silnika Diesla. Z danych przedstawionych na rysunkach 15. i 16. wynika, że podczas pracy silnika Diesla były emitowane przede wszystkim cząstki drobne. Stężenia liczbowe cząstek o wymiarach od 15 do 661 nm (rys. 15.) wahały się w ciągu 300 min działania silnika w zakresie $3,30 \div 8,84e^{+6}$ cząstek·cm⁻³, natomiast stężenia liczbowe cząstek o wymiarach 300 ÷ 400 nm (rys. 16.) w zakresie $0,93 \div 3,50e^{+3}$ cząstek·cm⁻³. Z badań przeprowadzonych z zastosowaniem licznika GRIMM wynika, że podczas emitowania spalin silników Diesla udział cząstek większych od 1 000 nm był nieznaczny (rys. 16.).



Rys. 14. Zmienność rozkładu wymiarowego cząstek emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika (pomiary SMPS): 21 min, 170 min, 206 min, 287 min

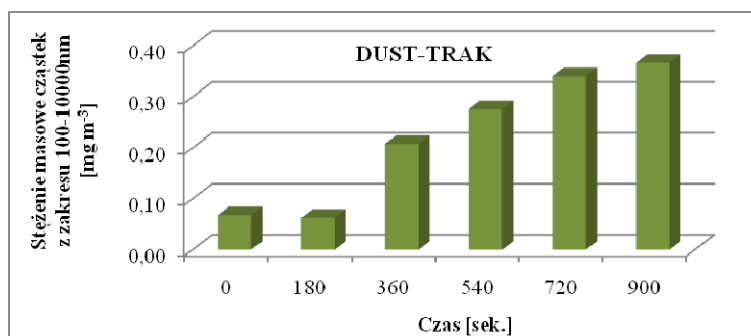


Rys. 15. Zmienność całkowitego stężenia liczbowego cząstek z zakresu 15 ÷ 661 nm emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika (pomiar SMPS z long DM)

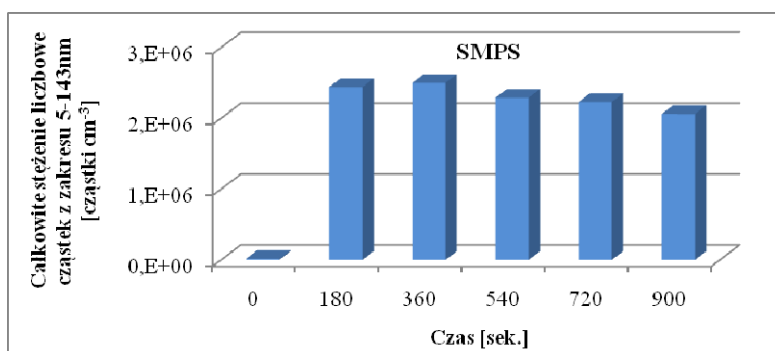


Rys. 16. Zmienność stężeń liczbowych frakcji cząstek z zakresu wymiarowego 300 ÷ 10 000 nm emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika (pomiar GRIMM)

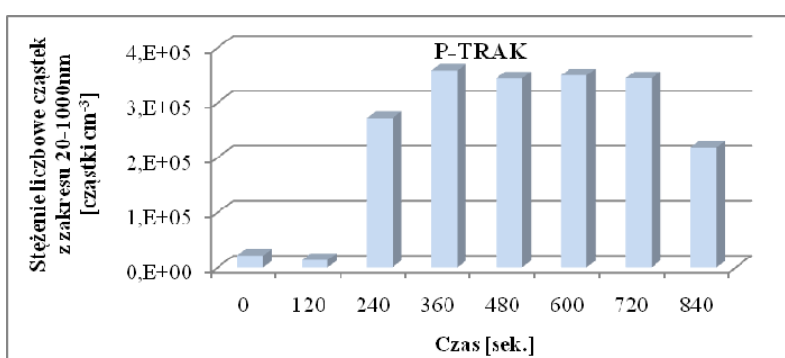
Na rysunkach 17 ÷ 21 przedstawiono natomiast przykładowe wyniki badań zmienności w czasie od włączenia silnika Diesla różnych parametrów fizycznych cząstek spalin, takich jak: stężenie masowe (DUST-TRAK), stężenie liczbowe cząstek (SMPS i P-TRAK) oraz powierzchnia cząstek (AERO-TRAK) w odniesieniu do tła (pomiar wykonany przed włączeniem silnika Diesla).



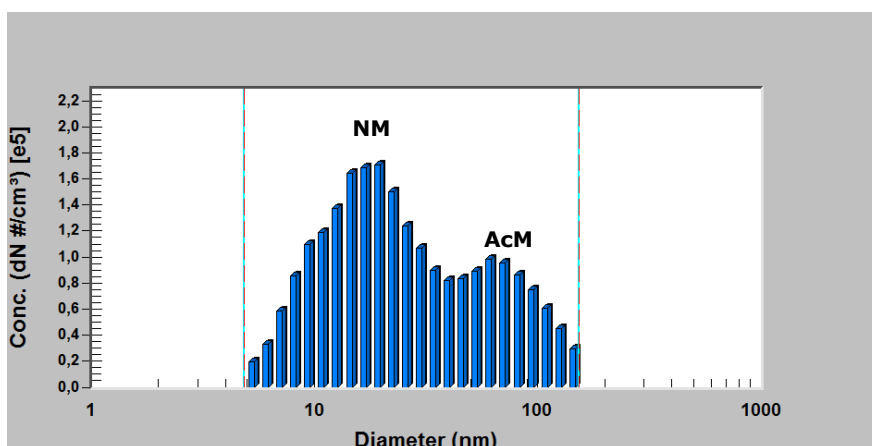
Rys. 17. Zmienność stężeń masowych cząstek z zakresu 100 ÷ 10 000 nm emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika w odniesieniu do pomiarów tła (czas = 0 s): pomiary DUST-TRAK



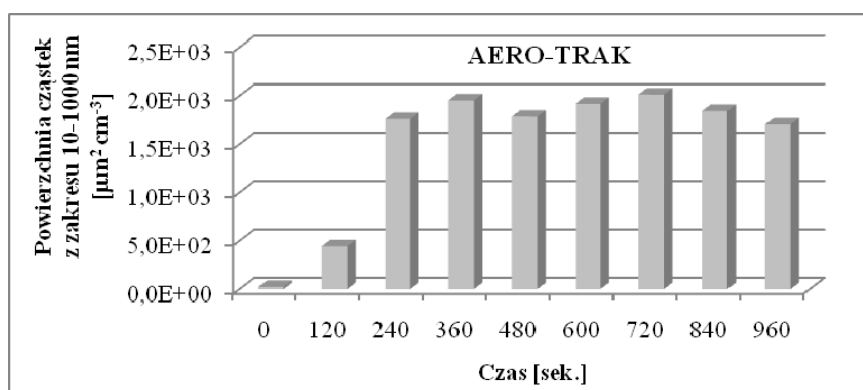
Rys. 18. Zmienność całkowitych stężeń liczbowych cząstek z zakresu 5 ÷ 143 nm emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika w odniesieniu do pomiarów tła (czas = 0 s): pomiary SMPS z nano DMA



Rys. 19. Zmienność stężeń liczbowych cząstek z zakresu 20 ÷ 1 000 nm emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika w odniesieniu do pomiarów tła (czas = 0 s): pomiary P-TRAK



Rys. 20. Rozkład wymiarowy cząstek ultradrobnych w spalinach silnika Diesla (NM – zarodki kondensacji, AcM – aglomeraty) – pomiary SMPS z nano DMA



Rys. 21. Zmienność powierzchni cząstek z zakresu $10 \div 1\ 000$ nm emitowanych z silnika Diesla w czasie, który upłynął od włączenia silnika w odniesieniu do pomiarów tła (czas = 0 s): pomiary AERO-TRAK (frakcja TB)

Z danych uzyskanych metodą fotometryczną (DUST-TRAK) wynika, że stężenie masowe cząstek z zakresu $100 \div 10\ 000$ nm wzrosło z $0,07\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (tło) do $0,37\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (rys. 17.). W porównaniu z tłem całkowite stężenie liczbowe cząstek z zakresu $5 \div 143$ nm wzrosło z $1,5e^{+4}$ cząstek $\cdot\text{cm}^{-3}$ do $2,5e^{+6}$ cząstek $\cdot\text{cm}^{-3}$ (SMPS, rys. 18.), natomiast z zakresu $20 \div 1\ 000$ nm – z $2,2e^{+4}$ cząstek $\cdot\text{cm}^{-3}$ do $3,6e^{+5}$ cząstek $\cdot\text{cm}^{-3}$ (P-TRAK, rys. 19.). Może to oznaczać, że większość emitowanych ultradrobnych cząstek miała wymiar mniejszy niż 20 nm, na co również wskazują dane przedstawione na rysunku 20. Powierzchnia drobnych cząstek spalin jest istotnym parametrem z uwagi na ich szkodliwe działanie na człowie-

ka. Przeprowadzone badania z zastosowaniem przyrządu AERO-TRAK wykazały znaczący wzrost powierzchni cząstek z zakresu $10 \div 1\ 000\ \text{nm}$: z $22\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ (tło) do $2\ 012\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$, przy włączonym silniku Diesla (rys. 21.).

3.3. Badanie niebezpiecznych substancji chemicznych we frakcjach drobnych spalin silników Diesla

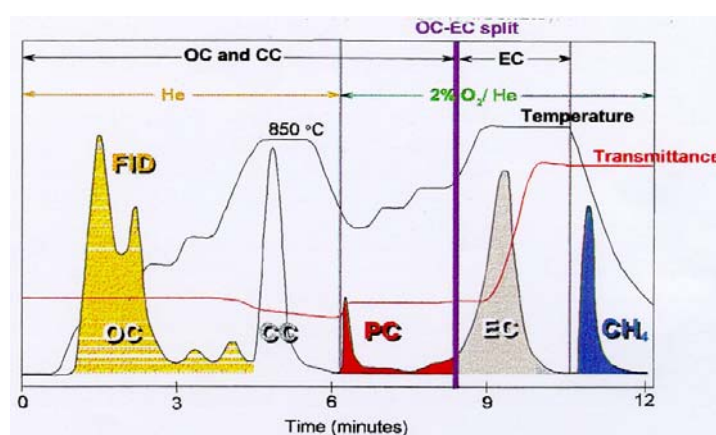
3.3.1. Metody badania

Jak wynika z rozdziału 1. spaliny silników Diesla są to wieloskładnikowe mieszaniny niebezpiecznych substancji chemicznych. Prawidłowa ocena narażenia zawodowego na substancje chemiczne wchodzące w skład spalin silników Diesla jest bardzo trudna, przede wszystkim ze względu na możliwość występowania kilkuset substancji chemicznych, zarówno we frakcji gazowej spalin, jak i zaadsorbowanych na cząstkach stałych, zmienność składu tych mieszanin oraz brak jednoznacznego poglądu na temat składników odpowiedzialnych za choroby nowotworowe u ludzi. Analiza ilościowa kilkuset substancji chemicznych wchodzących w skład tych spalin nie jest możliwa do wykonania, jak również jest niecelowa ze względu na brak kryteriów (wartości NDS dla środowiska pracy i powietrza atmosferycznego) do oceny uzyskiwanych wyników pomiarów.

Badania spalin silników Diesla metodą termooptyczną wykazały, że węgiel elementarny stanowi 64% całkowitej ilości węgla zawartego w spalinach. Z tego względu zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 14530:2005 [40] stężenie węgla elementarnego w powietrzu powinno być uwzględnione w ocenie narażenia pracowników na spaliny silników Diesla.

W 2001 r. zaproponowano, aby podstawą oceny narażenia na spaliny silników Diesla było stężenie frakcji respirabilnej węgla elementarnego zawartej w tych spalinach. Wartość TLV dla spalin silników Diesla odniesiona do frakcji respirabilnej węgla elementarnego wynosi $0,02\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [1]. Do oznaczania stężeń węgla elementarnego w powietrzu na stanowiskach pracowników narażonych na spaliny silników Diesla jest wykorzystywana w USA metoda z zastosowaniem analizatora termooptycznego aerozoli węglowodorków [16]. Metoda ta umożliwia selektywne oznaczanie stężeń węgla elementarnego w obecności lotnych i trudno lotnych związków organicznych oraz nieorganicznych zawierających węgiel (węglany). Badany aerozol jest zbierany z zastosowaniem odpowiednich impaktorów, w których oddziela się frakcję cząstek o średnicy aerodynamicznej mniejszej od

1 μm , czyli cząstek, które stanowią ponad 90% spalin silników Diesla. Termooptyczna analiza jest stosowana w celu ilościowego oznaczenia różnych rodzajów węgla. W pierwszym etapie analizy lotne związki organiczne są utleniane do ditlenku węgla, który po redukcji do metanu jest oznaczany za pomocą detektora płomieniowo-jonizacyjnego. W drugim etapie analizy, podczas którego jest oznaczany węgiel elementarny, obniża się temperaturę komory spalania, wprowadza tlen i powtórnie podgrzewa do 750 °C (rys. 22.). Metoda ta umożliwia oznaczenie 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ węgla elementarnego, przy pobieraniu próbki powietrza około 2 m^3 .



Rys. 22. Termogram próbki filtra zawierającego węgiel organiczny (OC), węglany (CC), węgiel elementarny (EC) [16]

Metoda ta ze względu na trudno dostępne analizatory termooptyczne niestety nie może być wykorzystywana w kraju. Do oznaczania węgla elementarnego w celu oceny narażenia zawodowego pracowników obsługujących pojazdy i urządzenia z silnikami Diesla można zaadaptować metodę oznaczania węgla elementarnego w pyłe w powietrzu atmosferycznym metodą chromatografii gazowej, opracowaną przez W. Mniszka i U. Zielonka [44], stosując do pobierania próbek powietrza próbnik typu PCIS w warunkach podanych w rozdziale 3.1.1. Filtr po pobraniu próbki należy ekstrahować w celu usunięcia związków organicznych mieszaniną benzenu i metanolu w aparacie Soxhleta przez 6 godzin w temperaturze wrzenia rozpuszczalników. Związki nieorganiczne węgla obecne w pyłe eliminuje się przez rozpuszczenie ich w 10-procentowym kwasie azotowym. Po ekstrakcji związków organicznych i nieorganicznych pozostały na filtrze pył spala się w rurze kwarcowej umieszczonej w cylindrycznym piecu elektrycznym, w atmosferze tlenu, w układzie zamkniętym z wymuszonym obiegiem gazów. Po zakończeniu spa-

lania oznacza się ditlenek węgla powstały w wyniku spalania węgla elementarnego metodą chromatografii gazowej.

W celu określenia zawartości głównych niebezpiecznych substancji chemicznych we frakcjach drobnych cząstek spalin silników Diesla zaleca się ilościowe oznaczenie we frakcji $\geq 0,25 \mu\text{m}$: wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) – naftalenu, acenaftenu, fluorenu, fenantrenu, antracenu, fluorantenu, pirenu, chryzenu, benzo[a]antracenu, benzo[b]fluorantenu, benzo[k]fluorantenu, benzo[a]pirenu, dibenzo[ah]antracenu, bo[ghi]perylenu.

Oznaczenie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA)

Z cząstek spalin zatrzymanych na filtrach podczas pobierania próbek powietrza (wg rozdziału 3.1.1) WWA należy ekstrahować 10 cm^3 dichlorometanu w łaźni ultradźwiękowej z lodem. Ekstrakty z filtrów odparować do sucha w atmosferze azotu. Suchą pozostałość rozpuścić w 1 cm^3 acetonitrylu i poddać analizie chromatograficznej. Analizę ilościową WWA należy prowadzić metodą HPLC z detekcją fluorescencyjną, w układzie faz odwróconych na chromatografii firmy Gyncoetek, stosując np. kolumnę Pinnacle II PAH ($15 \text{ cm} \times 3,2 \text{ mm}$) w temperaturze $25 \text{ }^\circ\text{C}$, fazę ruchomą acetonitryl: woda o programowanym składzie i szybkości przepływu $0,97 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ oraz detektor fluorescencyjny przy długości fal wzbudzenia i emisji dla 15 WWA podanych w tabeli 2.

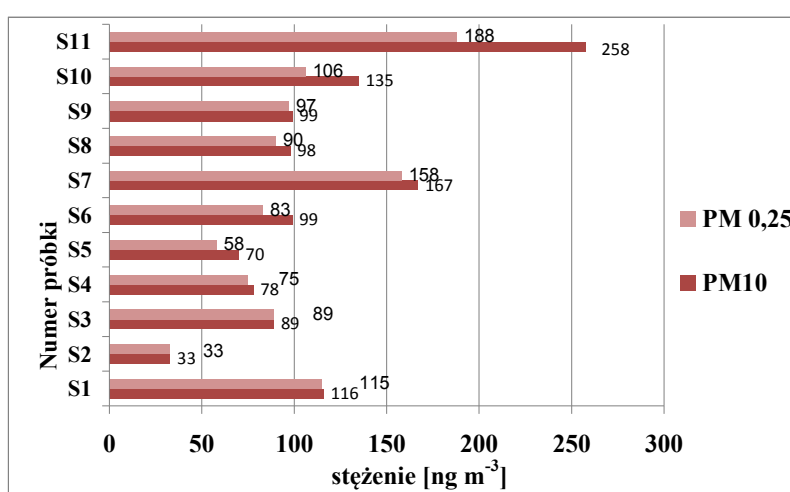
Tabela 2. Parametry detektora fluorescencyjnego dla badanych WWA

Nazwa związku	Długość fali wzbudzenia nm	Długość fali emisji nm
Naftalen, acenaften, fluoren	280	330
Fenantren	246	370
Antracen	250	406
Fluoranten	280	450
Piren	270	390
Chryzen, benzo[a]antracen	265	380
Benzo[b]fluoranten, benzo[k]fluoranten, benzo[a]piren	290	430
Dibenzo[ah]antracen, benzo[ghi]perylen	290	410
Indeno[1,2,3-cd]piren	300	500

3.3.2. Przykładowe wyniki badań

Przeprowadzane badania wykazały, że sumaryczne stężenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych we frakcji $\geq 0,25 \mu\text{m}$ cząstek stałych spalin silników Diesla były wyższe niż stężenia tych substancji chemicznych w pozostałych badanych frakcjach. Udział procentowy stężenia WWA we frakcji $\text{PM}_{0,25}$ mieścił się w zakresie $73 \div 100\%$.

Stężenia WWA we frakcjach $\text{PM}_{0,25}$, $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} spalin silników Diesla przedstawiono na rysunku 23.



Rys. 23. Zawartość WWA we frakcjach PM_{10} i $\text{PM}_{0,25}$ spalin silników Diesla

4. Ograniczanie narażenia na spaliny silników Diesla

4.1. Środki ochrony zbiorowej – wentylacja i klimatyzacja

Priorytetowymi środkami do eliminowania spalin silników Diesla ze środowiska pracy i życia powinny być środki ochrony zbiorowej, tzn. instalacje wentylacji i klimatyzacji wyposażone w wielostopniowe układy do oczyszczania powietrza ze szkodliwych cząstek oraz gazów i par zawartych w spalinach.

Projektowanie instalacji wentylacji i klimatyzacji powinno być poprzedzone analizą wymagań prawnych w zakresie ochrony zdrowia osób zawodowo narażonych na spaliny silników Diesla oraz populacji ogólnej społeczeństwa narażonej przede wszystkim na emisję spalin w garażach zlokalizowanych w budynkach jedno- lub wielorodzinnych. Analiza powinna również obejmować wymagania prawne dotyczące ochrony środowiska naturalnego w zakresie poziomów substancji zanieczyszczających, które mogą być emitowane do atmosfery.

Instalacje wentylacji lub klimatyzacji powinny być wykonane zgodnie z założeniami projektowymi, a następnie poddane kontroli działania, której celem jest potwierdzenie możliwości ich funkcjonowania zgodnie z prawem, wymaganiami projektowymi i normami przedmiotowymi.

Podczas użytkowania instalacji wentylacji i klimatyzacji należy, w określonych w przepisach prawa warunkach, kontrolować w sposób ciągły stężenie tlenu węgla oraz w ściśle określonych odstępach czasu sprawdzać parametry powietrza istotnie uzależnione od pracy instalacji (np. strumienie objętości powietrza nawiewanego, wywiewanego lub odciąganego czy stężenia cząstek, par i gazów). W sposób regularny należy nadzorować pracę wszystkich elementów instalacji, przy czym szczególną uwagę należy zwrócić na właściwe działanie układów oczyszczających powietrze ze spalin.

4.1.1. Wymagania

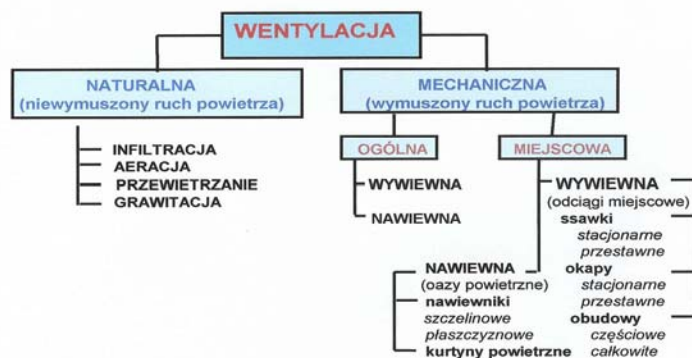
Odpowiednia jakość powietrza w pomieszczeniu, w którym są emitowane spaliny silników Diesla, powinna być zapewniona przez stosowanie wentylacji lub klimatyzacji spełniającej wymagania przepisów prawa, norm, wytycznych i zaleceń w odniesieniu do warunków czerpania powietrza z zewnątrz, jego przygotowywania (oczyszczania i zapewniania odpowiedniej temperatury i wilgotności względnej

powietrza), a następnie rozprowadzania w pomieszczeniu i/lub odciągania w miejscu emisji spalin, po czym wyrzucania powietrza oczyszczonego do atmosfery [22–25, 27, 28, 35–37].

Czerpnie powietrza w instalacjach wentylacji i klimatyzacji powinny być zlokalizowane w sposób umożliwiający pobieranie w danych warunkach jak najczystszego i, w okresie letnim, najchłodniejszego powietrza. Powinny być one zabezpieczone przed opadami atmosferycznymi i działaniem wiatru. Nie należy lokalizować czerpni w miejscach, w których istnieje niebezpieczeństwo napływu powietrza wywiewanego z wyrzutni. Szczegółowe informacje dotyczące sytuowania czerpni są zamieszczone w rozporządzeniu ministra infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [22].

Powietrze zewnętrzne doprowadzone do pomieszczeń za pomocą wentylacji mechanicznej powinno być zabezpieczone przed zanieczyszczeniami znajdującymi się w powietrzu zewnętrznym. Powietrze zanieczyszczone w stopniu przekraczającym wymagania określone dla powietrza wewnętrznego powinno być oczyszczone przed wprowadzeniem do wentylowanych pomieszczeń, z uwzględnieniem zanieczyszczeń występujących w pomieszczeniu. W zależności od wymagań stawianych czystości powietrza w pomieszczeniach powinny być stosowane jedno- lub wielostopniowe układy oczyszczania.

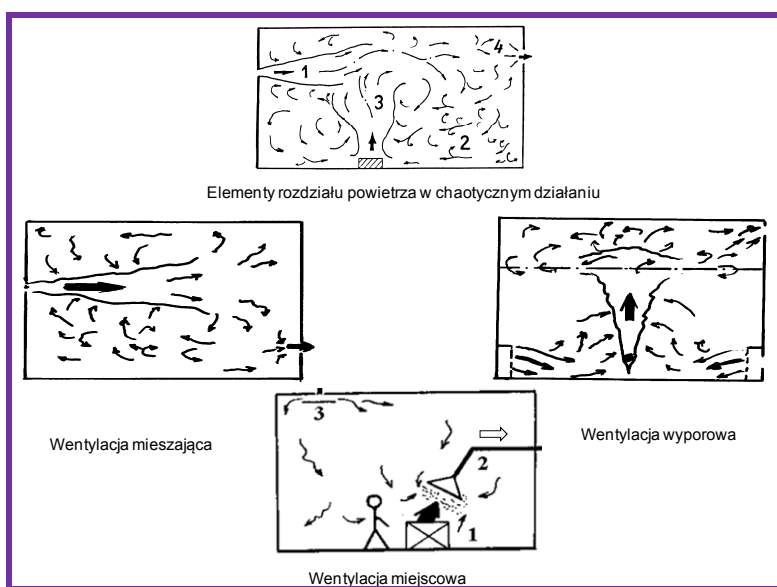
Rodzaj zastosowanej wentylacji lub klimatyzacji jest ściśle uzależniony od przeznaczenia pomieszczenia, w którym są emitowane spaliny silników Diesla. W pomieszczeniach o wysokich stężeniach spalin emitowanych ze źródeł punktowych (np. warsztaty mechaniczne) należy jednocześnie stosować wentylację miejscową i wentylację ogólną, natomiast w garażach w budynkach jedno- lub wielorodzinnych – wentylację grawitacyjną lub wentylację ogólną o parametrach zdeterminowanych wielkością i sposobem użytkowania takich garaży. Schemat podziału wentylacji mechanicznej i wentylacji naturalnej jest przedstawiony na rysunku 24.



Rys. 24. Rodzaje wentylacji

Jako kryterium podziału przyjęto rodzaj czynnika wywołującego ruch powietrza. Czynnikiem wywołującym naturalną wymianę powietrza jest różnica ciśnień spowodowana różnicą temperatur w budynku i na zewnątrz, energią wiatru i odległością między otworami doprowadzającymi powietrze świeże i odprowadzającymi powietrze zużyte. Natomiast wentylacja mechaniczna jest zorganizowaną wymianą powietrza, którą zapewnia działanie takich środków technicznych, jak np. wentylatory. W sytuacji, gdy niezbędne jest stworzenie w pomieszczeniu mikroklimatu spełniającego w sposób ciągły, niezależnie od zewnętrznych warunków atmosferycznych, określone wymagania, musi być zastosowana klimatyzacja, która nie tylko zapewnia odpowiednie ilości powietrza, lecz również jego wymaganą jakość (wilgotność, temperaturę itp.).

Istotnym zagadnieniem jest zapewnienie właściwego rozdziału powietrza w pomieszczeniu. Na rysunku 25. przedstawiono elementy przepływowe rozdziału powietrza [14].



Rys. 25. Elementy przepływowe rozdziału powietrza

Niewłaściwy rozdział powietrza w pomieszczeniach może prowadzić do powstawania obszarów niewentylowanych [8], co szczególnie w przypadku spalin silników Diesla może skutkować gromadzeniem się zanieczyszczeń o znacznych stężeniach w różnych obszarach pomieszczeń, w zależności od ich właściwości.

Zwykle parametrem, którym charakteryzuje się wentylację ogólną, jest liczba wymian powietrza na godzinę. Na etapie projektowania wentylacji liczba wymian

powietrza jest z reguły obliczana w odniesieniu do intensywności emisji spalin silników Diesla:

- w warsztatach mechanicznych – w odniesieniu do stężenia spalin u źródła ich emisji podczas prac wykonywanych z włączonym silnikiem Diesla; istotny wpływ na liczbę obliczanych wymian powietrza ma rodzaj planowanej do zastosowania wentylacji miejscowej (zwykle odciągu miejscowego podłączonego do systemu odciągającego i oczyszczającego powietrze ze spalin),
- w garażach – w odniesieniu do czasu pracy silnika Diesla w najbardziej niekorzystnych warunkach, to znaczy podczas uruchamiania, rozgrzewania i wyjazdu lub powrotu osób użytkujących pojazdy [<http://wentylacja.com.pl>].

Wentylacja lub klimatyzacja pomieszczeń, w których występuje zawodowe narażenia na spaliny silników Diesla (np. warsztaty mechaniczne) powinna przynajmniej spełniać wymagania zawarte w rozporządzeniu w sprawie ogólnych przepisów BHP [23] oraz wszystkie wymagania zdeterminowane procesem pracy i prawem.

W garażach, zgodnie z § 108. 1. rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [22], należy stosować wentylację:

1. w garażu zamkniętym:

- 1) co najmniej naturalną, przez przewietrzanie otworami wentylacyjnymi, o łącznej powierzchni netto otworów wentylacyjnych nie mniejszej niż $0,04 \text{ m}^2$ na każde, wydzielone przegrodami budowlanymi, stanowisko postojowe – w nieogrzewanych garażach nadziemnych wolno stojących, przybudowanych lub wbudowanych w inne budynki,
- 2) co najmniej grawitacyjną, zapewniającą 1,5-krotną wymianę powietrza na godzinę – w ogrzewanych garażach nadziemnych lub częściowo zagłębionych, mających nie więcej niż 10 stanowisk postojowych,
- 3) mechaniczną, sterowaną czujkami niedopuszczalnego poziomu stężenia tlenu węgla – w innych garażach, niewymienionych w pkt 1 i 2, oraz w kanałach rewizyjnych, służących zawodowej obsłudze i naprawie samochodów bądź znajdujących się w garażach wielostanowiskowych.

2. W garażu otwartym należy zapewnić przewietrzanie naturalne kondygnacji spełniające następujące wymagania:

- 1) łączna wielkość niezamykanych otworów w ścianach zewnętrznych na każdej kondygnacji nie powinna być mniejsza niż 35% powierzchni ścian, z dopuszczeniem zastosowania w nich stałych przesłon żaluzjowych, nieograniczających wolnej powierzchni otworu,
- 2) odległość między parą przeciwległych ścian z niezamykanymi otworami nie powinna być większa niż 100 m,
- 3) zagłębienie najniższego poziomu posadzki nie powinno być większe niż 0,6 m poniżej poziomu terenu bezpośrednio przylegającego do ściany zewnętrznej garażu, a w przypadku większego zagłębienia – należy zastosować fosę o nachyleniu zboczy nie większym niż 1:1.

Powietrze wywiewane z budynków lub pomieszczeń [22], zanieczyszczone w stopniu przekraczającym wymagania określone w przepisach dotyczących poziomów substancji zanieczyszczających powietrze zewnętrzne [25], powinno być oczyszczone przed wprowadzeniem do atmosfery.

Wyrzutnie powietrza w instalacjach wentylacji i klimatyzacji powinny być zabezpieczone przed opadami atmosferycznymi i działaniem wiatru oraz być zlokalizowane w miejscach, umożliwiających odprowadzenie wywiewanego powietrza bez powodowania zagrożenia zdrowia użytkowników budynku i ludzi w jego otoczeniu oraz wywierania szkodliwego wpływu na budynek.

4.1.2. Kontrola działania instalacji wentylacji i klimatyzacji na zgodność z wymaganiami

Instalacja wentylacji i klimatyzacji powinna być poddana kontroli działania, której celem jest potwierdzenie możliwości jej funkcjonowania zgodnie z wymaganiami. Badanie to pokazuje, czy poszczególne elementy instalacji, takie jak filtry, wentylatory, wymienniki ciepła, nawilżacze itp., zostały prawidłowo zamontowane i działają efektywnie [37].

Przed rozpoczęciem kontroli działania instalacji należy wykonać prace wstępne, które powinny przede wszystkim potwierdzić zdolność instalacji do pracy ciągłej, wprowadzić wszystkie urządzenia i elementy w stan ich działania przewidziany projektem technicznym oraz stworzyć odpowiednie dokumenty potwierdzające ten stan.

Kontrola działania powinna postępować w określonej kolejności: od pojedynczych urządzeń i elementów instalacji, przez poszczególne układy instalacji, do całej instalacji.

Poszczególne elementy i układy instalacji powinny być wprowadzane w ich określone reżimy pracy (np. użytkowanie/nie użytkowanie pomieszczeń, częściowa i pełna wydajność, stany alarmowe itp.), przy czym powinno się uwzględnić blokady i współdziałanie różnych układów regulacji, jak również sekwencje regulacji i symulację odbiegających od normy warunków, dla których zastosowano dany układ regulacji lub występuje określona odpowiedź układu regulacji.

Należy obserwować rzeczywistą reakcję poszczególnych elementów składowych instalacji, gdyż wskazania elementów regulacyjnych i inne pośrednie wskaźniki nie są wystarczające. W celu potwierdzenia prawidłowego działania urządzeń regulacyjnych należy również obserwować zależność między sygnałem wymuszającym a działaniem tych urządzeń.

Działanie regulatora może być sprawdzone przez kilkakrotną zmianę jego nastawy w obu kierunkach, z jednoczesnym sprawdzeniem działania spowodowane-

go przez ten regulator. Jeśli badanie to wykaże usterkę, trzeba sprawdzić sygnał wejściowy regulatora. Należy obserwować stabilność działania instalacji jako całości. W czasie kontroli działania instalacji należy dokonać weryfikacji poprzednio wykonanych badań, nastaw i regulacji. Pomiary powinny być wykonywane tylko przez osoby mające odpowiednią wiedzę i doświadczenie.

W celu określenia wpływu parametrów środowiska wewnątrz pomieszczenia na przebywające w nim osoby zaleca się wykonywanie badań w strefie przebywania ludzi. Pomiary należy wykonywać w strefie przebywania ludzi w miejscach, w których obserwuje się lub przewiduje występowanie ekstremalnych wartości parametrów.

4.1.3. Kontrola instalacji wentylacji i klimatyzacji w warunkach użytkowania

W okresie użytkowania instalacji występują trzy poziomy wykonywania czynności kontrolnych instalacji:

- bieżąca kontrola instalacji,
- kontrola instalacji po dokonanych „małych zmianach” w instalacji,
- kontrola instalacji po dokonanych „dużych zmianach” w instalacji.

Utrzymywanie i kontrola skuteczności działania instalacji na bieżąco stanowi ciągły proces polegający na zapewnieniu utrzymania poziomu jej działania uzyskanego w wyniku czynności odbiorowych oraz aktualizacji dokumentacji eksploatacyjnej.

„Małe zmiany” w instalacji wymagają przeprowadzenia co najmniej następujących działań:

- korekty dokumentów eksploatacyjnych i inwentarzowych związanych z dokonanymi zmianami, m.in. danych eksploatacyjnych, rysunków powykonawczych, schematów, instrukcji eksploatacji,
- pomiarów i regulacji zmodyfikowanych instalacji lub ich części,
- przeszkolenia służb eksploatacyjnych w zakresie zmian dokonanych w instalacji.

„Duże zmiany” w instalacji wymagają przeprowadzenia pełnego cyklu odbiorowego budynku.

Czynności obsługowe związane z utrzymaniem instalacji w czystości są, wraz z czynnościami obsługowymi związanymi z konserwacją, zgodnymi z instrukcjami producentów, podstawą zapewnienia odpowiednich warunków środowiska wewnętrznego w pomieszczeniach.

Zgodnie z dyrektywą 2002/91/WE [21] obiekt budowlany oraz jego system ogrzewania i wentylacji powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób,

żeby ilość energii potrzebna do obsługi budynku była jak najmniejsza. W związku z tym instalacje wentylacji mechanicznej i klimatyzacji w pomieszczeniach z emisją spalin należy stosować w sposób umożliwiający uzyskanie zakładanej jakości środowiska w pomieszczeniu przy racjonalnym zużyciu energii.

4.1.4. Układy do oczyszczania powietrza

Zarówno w instalacjach wentylacji ogólnej, jak i wentylacji miejscowej elementami decydującymi o jakości powietrza odprowadzanego lub doprowadzanego do pomieszczeń są układy oczyszczające jedno- lub wielostopniowe. Układy oczyszczania powietrza powinny być zaprojektowane i zainstalowane w taki sposób, aby zapewniały właściwą czystość powietrza w pomieszczeniach w odniesieniu do cząstek spalin silników Diesla (filtry powietrza) i oczyszczenie powietrza z par i gazów zawartych w spalinach, z wykorzystaniem odpowiednich sorbentów.

Podstawowe parametry użytkowe filtrów do oczyszczania powietrza z cząstek, przewidziane do zastosowania w układach oczyszczających w instalacjach wentylacji ogólnej, powinny być określone zgodnie z zaleceniami zawartymi w normach [35, 36]. Podział filtrów powietrza na klasy jest dokonywany na podstawie ich skuteczności filtracji, określonej z wykorzystaniem adekwatnych do typu badań aerozoli testowych. Klasyfikacja filtrów wstępnych (klasy G1-G4) i filtrów dokładnych (klasy F5-F9) jest przedstawiona w tabeli 3., natomiast filtrów wysoko skutecznych – w tabeli 4.

Tabela 3. Klasyfikacja wstępnych i dokładnych filtrów powietrza zgodnie z normą PN-EN 779:2005 [35]

Klasa filtra	Końcowy opór przepływu, Pa	Średnie zatrzymanie pyłu syntetycznego (A_m), %	Średnia skuteczność dla cząstek o wymiarach $0,4 \mu\text{m}$ (E_m), %
G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-
G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-
G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-
G4	250	$90 \leq A_m$	-
F5	450	-	$40 \leq E_m < 60$
F6	450	-	$60 \leq E_m < 80$
F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$
F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$
F9	450	-	$95 \leq E_m$

Tabela 4. Klasyfikacja wysoko skutecznych filtrów powietrza zgodnie z normą PN-EN 1822-1:2009 [36]

Klasa filtra	Wartość całkowita		Wartość miejscowa	
	skuteczność %	penetracja %	skuteczność %	penetracja %
E 10	≥ 85	≤ 15	-	-
E 11	≥ 95	≤ 5	-	-
E 12	≥ 99,5	≤ 0,5	-	-
H 13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
H 14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U 15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
U 16	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
U 17	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

Podczas użytkowania filtrów zatrzymujących cząstki stałe spalin należy w sposób ciągły kontrolować spadki ciśnienia na filtrach. W przypadku przekroczenia zalecanego dla danej klasy filtracyjnej oporu przepływu przez filtr stosowany w układzie oczyszczającym należy ten filtr natychmiast wymienić.

4.2. Środki ochrony indywidualnej – sprzęt ochrony dróg oddechowych

4.2.1. Kryteria i zasady doboru

Do najskuteczniejszych środków profilaktycznych przed zagrożeniami związanymi ze spalinami silników Diesla należą sprawnie działające systemy wentylacyjne. Jednakże tam, gdzie stosowanie tych systemów nie jest możliwe ze względu na charakter czynności zawodowych pracowników, dostarczanie pracownikom prawidłowo dobranych środków ochrony układu oddechowego staje się podstawowym obowiązkiem pracodawcy [23]. Przyjmuje się, że aby sprzęt ochronny odpowiednio spełniał swoje funkcje, powinien:

- zostać prawidłowo dobrany do istniejącego zagrożenia, a więc proces doboru powinien uwzględniać identyfikację zanieczyszczeń powietrza występujących lub mogących powstać na poszczególnych stanowiskach pracy oraz ustalenie ich wpływu na organizm człowieka,
- odpowiadać warunkom panującym na danym stanowisku pracy,
- odpowiadać wymaganiom ergonomicznym i uwzględniać stan zdrowia pracownika,

- być dopasowany indywidualnie do każdego użytkownika – ochrona nie powinna powodować dyskomfortu przy wykonywaniu pracy.

Sprzęt ochrony układu oddechowego zabezpiecza organizm przed wchłanianiem z atmosfery substancji niebezpiecznych i szkodliwych, stanowiących grupę czynników wysokiego ryzyka. Chroni przed zagrożeniami, które mogą spowodować poważne i nieodwracalne uszkodzenia zdrowia, a także utratę życia. Dlatego tak istotne jest dobranie sprzętu zarówno o właściwym zakresie ochrony jak i skuteczności.

Rodzaje sprzętu ochrony układu oddechowego zalecanego do stosowania wobec zagrożeń substancjami pochodzącymi ze spalin silników Diesla

Do ochrony układu oddechowego przed zagrożeniami substancjami pochodzącymi ze spalin silników Diesla powinien być stosowany oczyszczający sprzęt ochrony układu oddechowego posiadający właściwości filtrujące i pochłaniające. Takim sprzętem są:

- filtropochłaniacze par organicznych skompletowane z odpowiednią częścią twarząwą w postaci: maski, półmaski, ćwierćmaski, ustnika,
- półmaski filtrująco-pochłaniające z zaworami,
- sprzęt z dodatkowym źródłem zasilania w postaci: sprzętu ze wspomaganie przepływu powietrza wyposażonego w maski, półmaski lub ćwierćmaski.

Filtropochłaniacz samodzielnie nie chroni układu oddechowego. Dopiero po skompletowaniu (jednego lub dwóch filtropochłaniaczy) z odpowiednią częścią twarząwą stanowi sprzęt o zróżnicowanym stopniu skuteczności ochrony. Filtropochłaniacze powinny spełniać wymagania normy PN-EN 14387+A1:2008 [39]. Na rysunku 26. podano przykłady filtropochłaniaczy, które można stosować do jednoczesnego oczyszczania powietrza z aerozoli i par substancji organicznych, występujących w spalinach silników Diesla.



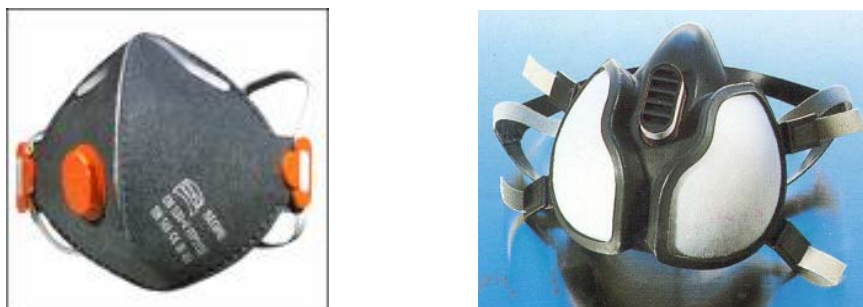
a)



b)

Rys. 26. Filtropochłaniacz do kompletowania: a) z jednofiltrową częścią twarząwą, b) z dwufiltrową częścią twarząwą

Półmaski filtrująco-pochłaniające z zaworami są to wielogazowe półmaski pochłaniające zawierające filtr. Oslaniają one nos, usta i podbródek użytkownika. Składają się całkowicie lub w zasadniczej części z materiału oczyszczającego lub zawierają część twarzową, w której pochłaniacz stanowi nierozłączną część tego sprzętu, a filtry mogą być wymienne. Półmaski filtrująco-pochłaniające z zaworami powinny spełniać wymagania normy PN-EN 405:2005 [32]. Przykłady tego typu półmasek przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Półmaski filtrująco-pochłaniające z zaworami

Sprzęt ze wspomaganie przepływu powietrza (rys. 28.) składa się z elementu oczyszczającego (filtropochłaniacza), części twarzowej w postaci maski, półmaski lub ćwierćmaski oraz dmuchawy noszonej przez użytkownika. Dmuchawa połączona jest z częścią twarzową bezpośrednio lub za pomocą giętkiego węża, a jej zadaniem jest wspomaganie przepływu powietrza przez element oczyszczający. Sprzęt ten może być używany również bez włączenia nawiewu.



Rys. 28. Sprzęt ze wspomaganie przepływu powietrza

Zaleca się stosowanie tego typu sprzętu do prac, podczas których występuje czasowe nasilenie zanieczyszczenia, ponieważ pozwala on na zmienne w czasie regulowanie stopnia skuteczności. Filtrująco-pochłaniający sprzęt ze wspomaganie przepływu powietrza powinien spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 12942:2002/A2:2008 [38].

Sprzęt filtrująco-pochłaniający należy dobrać według zasad odnoszących się do:

- sprzętu filtrującego, tzn. w zależności od stężenia aerozolu – posługując się krotnością przekroczenia wartości NDS danej substancji (rodzaj i klasa sprzętu),
- sprzętu pochłaniającego, tzn. w zależności od rodzaju gazu i/lub par występujących w powietrzu na stanowisku pracy (typ sprzętu) i ich stężenia objętościowego (klasa sprzętu).

Aby dokonać właściwego doboru klasy ochronnej filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego, należy przede wszystkim dokładnie rozpoznać zagrożenia, jakie występują na stanowiskach pracy. Wiąże się to z określeniem rodzaju zanieczyszczeń oraz pomiarem ich stężeń i ustaleniem maksymalnych wartości występujących w czasie dnia pracy w danym środowisku pracy. Pomiary te należy odnieść do wartości NDS, bowiem od krotności przekroczenia NDS zależy klasa ochronna sprzętu. Im większe przekroczenie wartości NDS, tym większym wskaźnikiem ochronnym powinien charakteryzować się sprzęt.

Miarą skuteczności sprzętu filtrującego jest jego klasa ochronna. Zostały wyodrębnione:

- **klasa P1:** sprzęt o małej skuteczności ochronnej,
- **klasa P2:** sprzęt o średniej skuteczności ochronnej,
- **klasa P3:** sprzęt o wysokiej skuteczności ochronnej.

Klasę ochronną sprzętu filtrującego można określić na podstawie nominalnego wskaźnika ochronnego **NPF**, który jest wyznaczany laboratoryjnie poprzez całkowity przeciek wewnętrzny aerozolu testowego chlorku sodu, według wzoru:

$$NPF = \frac{100}{CPW}$$

gdzie:

CPW – całkowity przeciek wewnętrzny aerozolu NaCl, %.

Nominalny wskaźnik ochrony, niezależnie od rodzaju sprzętu, jest co do wartości równy odwrotności całkowitego przecieku wewnętrznego i jest wielkością niemianowaną, określającą krotność obniżenia stężenia substancji niebezpiecznej pod częścią twarząwą sprzętu na skutek zastosowanej ochrony.

W celu ułatwienia wyboru sprzętu o właściwej klasie ochronnej, w tabeli 5. przedstawiono wartości NPF dla sprzętu oczyszczającego.

Tabela 5. Zestawienie wartości NPF dla sprzętu oczyszczającego

Rodzaj sprzętu oczyszczającego	NPF		
	klasa ochrony P1	klasa ochrony P2	klasa ochrony P3
Filtropochłaniacz po skompletowaniu z:			
- półmaską lub ćwierćmaską	4	9	20
- maską	5	16	1000
Półmaska filtrująco-pochłaniająca z zaworami	–	–	20
Sprzęt ze wspomaganie przepływu powietrza			
- przy wyłączonym zasilaniu	20	100	1000
- przy włączonym zasilaniu	20	200	2000
Sprzęt z wymuszonym przepływem powietrza	10	50	500

Aby właściwie dobrać klasę ochronną sprzętu do zagrożeń występujących na stanowisku pracy, trzeba określić relację, w jakiej pozostaje stężenie substancji niebezpiecznej do jej dopuszczalnych wartości NDS. Można tego dokonać poprzez wyznaczenie minimalnej wartości wskaźnika ochrony MPF, według wzoru:

$$MPF = \frac{\text{maksymalne stężenie zanieczyszczenia środowiska zewnętrznego}}{NDS}$$

MPF określa krotność przekroczenia wartości granicznych stężenia substancji niebezpiecznej. Im większe przekroczenie wartości granicznej, tym wyższą skutecznością powinien charakteryzować się sprzęt.

Po wytypowaniu klasy ochronnej i typu filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego należy dokonać wyboru sprzętu pochłaniającego w zależności od:

- rodzaju gazu i/lub pary, występujących w powietrzu na stanowisku pracy (typ sprzętu),
- stężenia objętościowego gazu i/lub pary w atmosferze środowiska pracy (klasa sprzętu).

W zależności od właściwości fizykochemicznych i toksycznych gazów i par substancji organicznych występujących w atmosferze środowiska pracy, wyróżnia się

typ A pochłaniacza o temperaturze wrzenia powyżej 65 °C, oznaczony kolorem brązowym.

Klasa ochronna pochłaniacza/półmaski pochłaniającej jest miarą skuteczności sprzętu pochłaniającego. Zostały wyodrębnione:

- **klasa 1:** sprzęt o niskiej pojemności sorpcyjnej, stosowany do ochrony układu oddechowego przed parami i/lub gazami, o ile ich łączne stężenie nie przekracza 0,1% obj.,
- **klasa 2:** sprzęt o średniej pojemności sorpcyjnej, stosowany do ochrony układu oddechowego przed parami i/lub gazami, o ile ich łączne stężenie nie przekracza 0,5% obj.,
- **klasa 3:** sprzęt o dużej pojemności sorpcyjnej, stosowany do ochrony układu oddechowego przed parami i/lub gazami, o ile ich łączne stężenie nie przekracza 1,0% obj.

Do ochrony przed zanieczyszczeniami znajdującymi się w spalinach silników Diesla, gdzie jednocześnie występują mieszaniny aerozoli i pary substancji organicznych w powietrzu, zaleca się stosowanie odpowiedniego sprzętu filtrująco-pochłaniającego, który jest kombinacją powyżej przedstawionych zakresów ochrony. Na przykład, sprzęt w postaci części twarzowej skompletowanej z filtropochłaniaczem typu **A1P2** jest przeznaczony jednocześnie do ochrony przed określonymi przez producenta organicznymi gazami i/lub parami substancji organicznych o temperaturze wrzenia powyżej 65 °C oraz aerozolami z cząstek stałych i ciekłych. Z kolei rozpatrując sprzęt oczyszczający w postaci półmaski filtrująco-pochłaniającej, należy wybrać półmaskę typu **FFA1P2**.

Filtrująco-pochłaniający sprzęt z dodatkowym źródłem zasilania ma takie same właściwości ochronne jak zastosowany w nim element oczyszczający – filtropochłaniacz.

Informacje dotyczące czasu użytkowania sprzętu filtrująco-pochłaniającego

Czas użytkowania sprzętu filtrująco-pochłaniającego zależy od następujących czynników:

- typu filtropochłaniacza/półmaski filtrująco-pochłaniającej,
- klasy ochronnej filtropochłaniacza/ półmaski filtrująco-pochłaniającej,
- rodzaju zanieczyszczeń (aerozoli, par i gazów),
- stężenia zanieczyszczeń,
- wilgotności i temperatury otaczającego powietrza,
- stopnia uciążliwości pracy.

Ustalony laboratoryjnie czas użytkowania dotyczy poszczególnych warstw ochronnych sprzętu: zarówno warstwy filtrującej jak i pochłaniającej.

Czas użytkowania warstwy filtrującej jest uzależniony głównie od rzeczywistych warunków, w jakich warstwa filtrująca jest stosowana.

Na obniżenie skuteczności i nadmierny wzrost oporu oddychania tego sprzętu, a co za tym idzie – skrócenie czasu użytkowania, może mieć wpływ: znaczne stężenie zapylenia, duża higroskopijność pyłów, podwyższona wilgotność powietrza, podwyższona temperatura powietrza oraz wykonywanie ciężkiej pracy.

W odniesieniu do poszczególnych klas skuteczności można przewidywać wystąpienie specyficznych zjawisk podczas użytkowania sprzętu. Tak więc:

- **sprzęt filtrujący klasy P1** charakteryzuje się stosunkowo niskimi oporami oddychania i nie przewiduje się znacznego ich wzrostu w czasie jednej zmiany roboczej. Zaleca się co najwyżej jedną wymianę sprzętu w czasie 8-godzinnego dnia pracy,
- **sprzęt filtrujący klasy P2** charakteryzuje się wyższymi oporami oddychania i w związku z tym może wystąpić wzrost oporu oddychania w czasie jednej zmiany roboczej. Zaleca się co najmniej jedną wymianę sprzętu w czasie 8-godzinnego dnia pracy,
- **sprzęt filtrujący klasy P3** charakteryzuje się wysokimi oporami oddychania i w związku z tym może nastąpić szybkie zatkanie powierzchni filtrującej i gwałtowny wzrost oporu oddychania w czasie jednej zmiany roboczej. Zaleca się co najmniej dwukrotną wymianę sprzętu w czasie 8-godzinnego dnia pracy.

Czas użytkowania warstwy filtrującej w sprzęcie z dodatkowym źródłem zasilania jest limitowany:

- szybkością zatkania filtrów,
- czasem działania akumulatorów.

Czas ochronnego działania (użytkowania) warstwy pochłaniającej zależy od następujących czynników:

- stężenia par i gazów w powietrzu,
- pojemności sorpcyjnej warstwy pochłaniającej,
- wilgotności i temperatury otaczającego powietrza,
- stopnia uciążliwości pracy.

Ustalony na podstawie badań laboratoryjnych czas ochronnego działania sprzętu filtrująco-pochłaniającego przedstawiono w tabeli 6. (dla przepływu $30 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ i stężenia 0,1% i 0,5% obj.).

Tabela 6. Czas ochronnego działania filtropochłaniaczy/półmasek filtrująco-pochłaniających

Typ i klasa filtropochłaniacza	Typ i klasa półmasek filtrująco-pochłaniającej	Substancja testowa	Minimalny czas przebicia w warunkach badania, min
A1 P1 A1 P2 A1 P3	FFA1P1 FFA1P2 FFA1P3	Cykloheksan (C ₆ H ₁₂)	70
A2 P1 A2 P2 A2 P3	FFA2P1 FFA2P2 FFA2P3	Cykloheksan (C ₆ H ₁₂)	35

W przypadku, gdy zaistnieje konieczność wymiany filtropochłaniaczy w dwufiltrowej części twarzowej, oba filtropochłaniacze należy wymienić jednocześnie.

W praktyce nie jest możliwe określenie dokładnego czasu ochronnego działania filtropochłaniacza/półmasek filtrująco-pochłaniającej. Dla użytkownika stosowanie sprzętu wiąże się z trudnościami w określeniu momentu, w którym niezbędna jest wymiana elementu oczyszczającego, spowodowana bądź nasyceniem sorbentu bądź zapchaniem się warstwy filtrującej.

Czas użytkowania sprzętu filtrująco-pochłaniającego z dodatkowym źródłem zasilania jest limitowany:

- szybkością zatkania filtrów,
- szybkością nasycenia warstwy sorpcyjnej,
- naładowaniem baterii.

Wybór skuteczności ochronnej sprzętu filtrująco-pochłaniającego jest podstawowym etapem doboru środków ochrony układu oddechowego, jednakże niewystarczającym do podjęcia ostatecznej decyzji. Dopiero dokonanie wyboru rozwiązania konstrukcyjnego sprzętu, a nawet ustalenie czasu jego stosowania i bezkolidyjności w stosunku do innych ochron (np. gogli, okularów) pozwala uznać proces doboru za zakończony. Wyposażając pracownika w środki ochrony indywidualnej, należy zawsze pamiętać, że ich użytkowanie wiąże się z odczuwaniem dyskomfortu, co może być przyczyną odrzucenia ochrony przez użytkownika.

Przeciwwskazania do stosowania sprzętu filtrująco-pochłaniającego

Filtrująco-pochłaniającego sprzętu ochrony układu oddechowego **nie wolno stosować** wówczas, gdy:

- w atmosferze środowiska pracy występuje niedobór tlenu, tzn. zawartość tlenu w powietrzu jest mniejsza niż 17% obj.,
- prace prowadzone są w małych nieprzewietrzalnych pomieszczeniach, np. kanałach, studzienkach, zbiornikach,
- w atmosferze środowiska pracy występują niezidentyfikowane substancje chemiczne,
- stężenie substancji niebezpiecznych w postaci aerozoli w powietrzu stanowiska pracy jest tak duże, że sprzęt ze względu na wskaźnik ochrony nie gwarantuje bezpiecznego użytkowania,
- stężenie par i gazów w atmosferze środowiska pracy jest większe niż 1% obj.,
- substancje niebezpieczne, w postaci gazów lub par substancji chemicznych, nie mają charakterystycznego zapachu i/lub smaku albo stężenie, przy którym są wyczuwalne, jest większe od wartości NDS,
- w atmosferze środowiska pracy występują ekstremalne warunki temperaturowe (zbyt wysoka lub zbyt niska temperatura powietrza),
- użytkownicy „szczelnie dopasowanego” sprzętu filtrująco-pochłaniającego mają zarost (brodę, bokobrody) lub nietypową, zdeformowaną (np. bliźniami) twarz, co uniemożliwia szczelne dopasowanie części twarzowej.

4.2.2. Zasady oceny właściwości ochronnych

W celu oceny właściwości ochronnych sprzętu ochrony układu oddechowego pełniącego rolę ochrony przed zanieczyszczeniami występującymi w spalinach silników Diesla należy zastosować wymagania odpowiednich norm odnoszących się do badań:

- penetracji aerozolu chlorku sodu,
- penetracji aerozolu mgły oleju parafinowego,
- czasu przebicia (pojemności sorpcyjnej) wobec par cykloheksanu.

Wszystkie parametry ochronne wyznacza się w ciągłym przepływie mieszaniny powietrza z aerozolem lub parą substancji organicznej.

Ocena parametrów użytkowych dla przedmiotowych ochron układu oddechowego polega na badaniu oporów przepływu powietrza, odzwierciedlających opór przepływu podczas wdechu i wydechu powietrza – w przypadku półmasek filtropochłaniających oraz opór wdechu powietrza – w przypadku filtropochłaniaczy. Zasady oceny parametrów ochronnych są zgodne z ustanowionymi zasadami badań penetracji dla filtracyjnych i filtrująco-pochłaniających materiałów stosowanych w konstrukcjach oczyszczającego sprzętu ochronnego, podanymi w normach: PN-EN 143:2004/A1:2007, PN-EN 149+A1:2009, PN-EN 405+A1:2009 PN-EN 14387+A1:2008, [30, 31, 33, 39].

Zgodnie z wymaganiami tych norm przyjmuje się kryteria oceny dla sprzętu filtrująco-pochłaniającego podane w tabelach 7. i 8.

Tabela 7. Kryteria oceny sprzętu filtrująco-pochłaniającego – penetracja aerozoli

Klasa sprzętu	Penetracja aerozolu chlorku sodu, %	Penetracja aerozolu mgły oleju parafinowego, %
Filtr P1	20	20
Filtr P2	6	6
Filtr P3	0,05	0,05
Półmaska filtrująco --pochłaniająca:		
FFAP1	20	20
FFAP2	6	6
FFAP3	1	1

Tabela 8. Kryteria oceny sprzętu filtrująco-pochłaniającego – czas przebicia

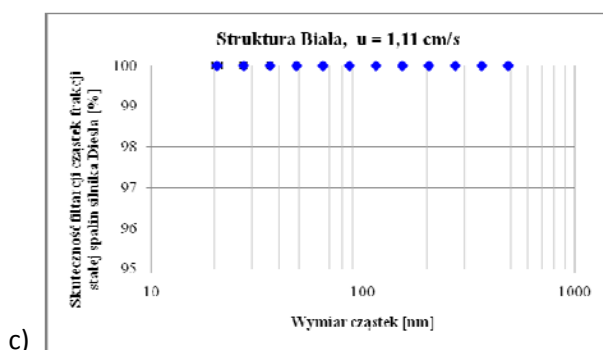
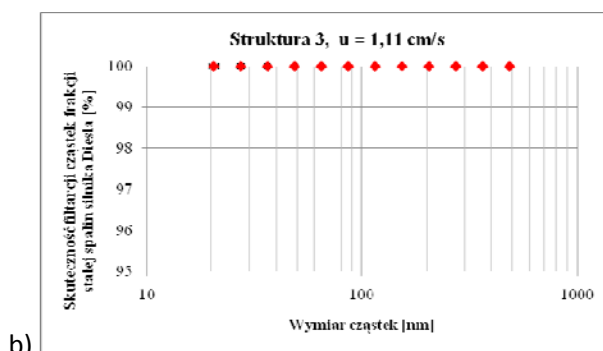
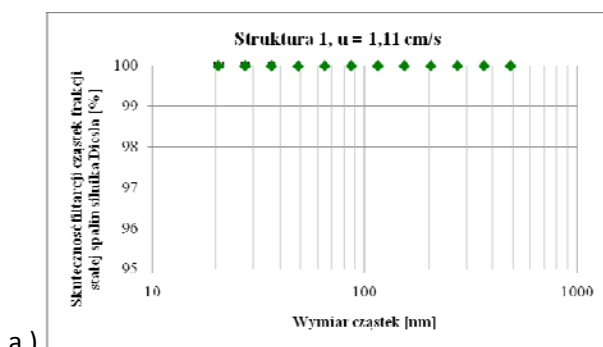
Klasa sprzętu	Czas przebicia wobec cykloheksanu, min
Filtropochłaniacz	
A1	70
A2	35
A3	65
Półmaska filtrująco-pochłaniająca	
FFA1	70
FFA2	35

4.3. Środki ochrony zawierające struktury filtracyjno-sorpcyjne

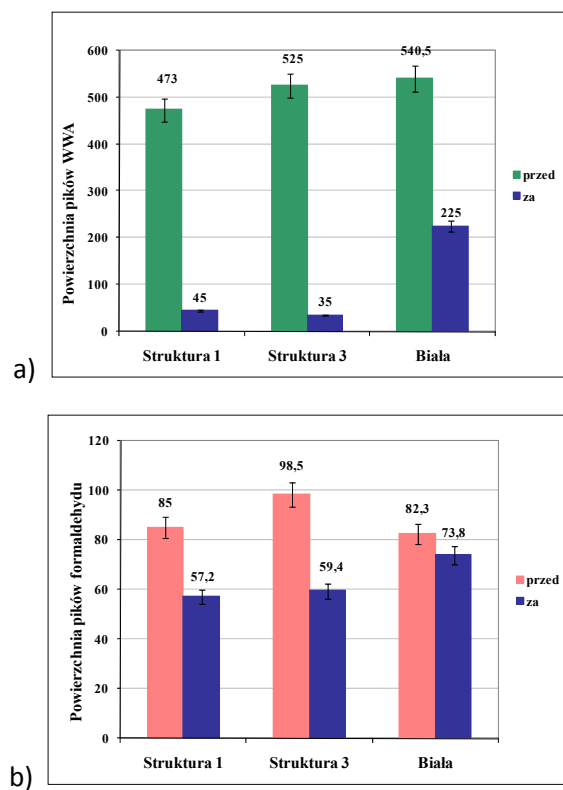
Zarówno w środkach ochrony zbiorowej, jak i indywidualnej preferowane powinny być układy oczyszczające powietrze ze spalin, które do wysoko skutecznej filtracji zawierałyby struktury filtracyjno-sorpcyjne składające się z pneumotermicznych włóknin filtracyjnych i sorpcyjnych, np. opracowane w ramach zadania VII.2 projektu PBZ-MEiN 3/2/2006.

Stosowanie układów zawierających tego rodzaju struktury filtracyjno-sorpcyjne umożliwiłoby jednoczesne oczyszczanie powietrza z ultradrobnych cząstek stałych i w znacznym stopniu z gazów i par zawartych w spalinach. Z analizy danych

przedstawionych na rysunkach 29. i 30. wynika, że przy prędkości przepływu spalin przez struktury filtracyjno-sorpcyjne, wynoszącej $u = 1,11 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, skuteczność filtracji cząstek spalin silników Diesla była bardzo wysoka (powyżej 99%), osiągając dla większości frakcji wymiarowych blisko 100%. Skuteczność sorpcji par substancji organicznych o temperaturze wrzenia $50 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$, wchodzących w skład spalin silników Diesla, była na poziomie 90%, a formaldehydu – ok. 24%. Wytworzone struktury nie adsorbowały tlenku węgla ani tlenków azotu.



Rys. 29. Frakcyjna skuteczność filtracji: a) struktury 1., b) struktury 3., c) struktury białej. Opory przepływu badanych struktur były w zakresie $20 \div 38 \text{ Pa}$



Rys. 30. Skuteczność sorpcji struktury 1., struktury 3. i struktury białej: a) węglowodory aromatyczne i alifatyczne, b) formaldehyd

Parametry struktury 3., która charakteryzowała się najlepszą skutecznością sorpcji i filtracji, podano w tabeli 9.

Tabela 9. Charakterystyka struktury 3

Budowa struktury	Masa powierzchniowa $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Zawartość węgla aktywnego $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Czas przebiecia wobec cykloheksanu $^{\circ} \text{s}$	Penetracja aerozolu chlorku sodu przy $15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, %	Penetracja aerozolu mgły oleju parafinowego przy $15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, %
Włóknina osłonowa	130	–	403	0,001	0,23
Włóknina filtracyjna	90	–			
Włóknina sorpcyjna	730	600			
Włóknina osłonowa	130	-			

* Stężenie cykloheksanu – $3435 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

5. Podsumowanie

Na obecnym etapie wiedzy toksykologicznej, epidemiologicznej oraz analitycznej w obszarze badania pyłów i chemicznych zanieczyszczeń powietrza ocena narażenia zawodowego na spaliny silników Diesla powinna uwzględniać charakterystyczną dla tych spalin emisję cząstek stałych w postaci węgla elementarnego i zaadsorbowanych na jego powierzchni substancji chemicznych o działaniu rakotwórczym i mutagennym, oprócz powszechnie oznaczanych niebezpiecznych gazów i par, tj. tlenków azotu, tlenku węgla, ditlenku siarki, formaldehydu, akrylaldehydu.

Z tego względu wskazane jest, aby ocena narażenia zawodowego została poszerzona o badania:

- stężenia masowego cząstek spalin o wymiarach poniżej 1000 nm metodą filtracyjno-wagową, stężenia liczbowego i powierzchniowego tych cząstek, głównie cząstek o wymiarach nanometrycznych poniżej 100 nm,
- stężenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych zaadsorbowanych na cząstkach stałych spalin.

Podjmując działania zmierzające do ograniczenia narażenia zawodowego na spaliny silników Diesla, należy preferować takie środki ochrony zbiorowej i sprzęt ochrony dróg oddechowych, w których zastosowano struktury filtracyjno-sorpcyjne składające się z włóknin filtracyjnych i sorpcyjnych.

6. Definicje

Zanieczyszczenie powietrza – zwykle obecność w atmosferze substancji powstających w wyniku działania człowieka lub procesów naturalnych, przy czym substancje te występują w stężeniach i w czasie wystarczającym do niekorzystnego wpływu na komfort, zdrowie i dobra materialne osób oraz stan środowiska [42].

Czynnik chemiczny stwarzający zagrożenie – czynnik chemiczny sklasyfikowany jako substancja lub preparat niebezpieczny z wyjątkiem niebezpiecznych wyłącznie dla środowiska; przez pojęcie to należy rozumieć także każdy czynnik chemiczny oraz pył, dla którego są ustalone wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń [9].

Aerozol – zawiesina cząstek stałych, ciekłych lub stałych i ciekłych w fazie gazowej o pomijalnej prędkości opadania [41].

Cząstka – mała odrębna część substancji stałej lub ciekłej [41].

Cząstka ultradrobna – cząstka o nominalnym wymiarze mniejszym niż 100 nm. Termin ten jest często stosowany w kontekście cząstek wytworzonych w wyniku procesu [29].

Średnica zastępcza aerodynamiczna cząstki – średnica kuli mającej w określonym ośrodku taką samą prędkość opadania (dla cząstek o wymiarach co najmniej 0,5 μm) jak cząstka badana; gęstość kuli przyjmuje się równą gęstości bezwzględnej cząstki (otrzymując średnicę zastępczą aerodynamiczną naturalną) lub równą 1 g cm^{-3} (otrzymując średnicę zastępczą aerodynamiczną umowną) [42].

Pył – ogólny termin stosowany do określenia cząstek ciała stałego różnej wielkości i różnego pochodzenia, przez pewien czas pozostających w zawieszeniu w gazie [41].

Emisja pyłu – wydzielanie pyłu do atmosfery. Punkt lub obszar, z którego zachodzi wydzielanie, nosi nazwę „źródła emisji” [41].

Wielkość emisji pyłu – masa pyłu emitowanego do atmosfery w jednostce czasu [41].

Stężenie pyłu – masa (liczba) cząstek ciała stałego w jednostce objętości gazu, w $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (liczba cząstek $\cdot \text{m}^{-3}$).

Stanowisko pracy – miejsce, w którym pracownik wykonuje czynności zawodowe stale lub okresowo [41].

Strefa oddychania – przestrzeń zawierająca powietrze pobierane przez ludzi bezpośrednio do oddychania. Stanowi ona półkulę o promieniu zazwyczaj przyjmowanym jako 3 dm, znajdującą się wokół twarzy, o środku w połowie linii łączącej uszy. Podstawą tej półkuli jest płaszczyzna przechodząca przez tę linię oraz czubek głowy i krtań [41].

Wskaźnik narażenia – wskaźnik liczbowy charakteryzujący narażenie pracowników na substancję szkodliwą, obliczony na podstawie wyników jej oznaczania w powietrzu w celu porównania z odpowiednią wartością dopuszczalną [42].

Najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) – wartość średnia ważona stężenia, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego czasu pracy i przeciętnego tygodniowego, wymiaru czasu pracy określonego w kodeksie pracy, przez okres jego aktywności zawodowej, nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń [24].

Najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe (NDSCh) – wartość średnia stężenia, które nie powinno spowodować ujemnych zmian w stanie zdrowia pracownika, jeżeli występuje w środowisku pracy nie dłużej niż 15 minut i nie częściej niż 2 razy w czasie zmiany roboczej, w odstępie czasu nie krótszym niż 1 godzina [24].

Najwyższe dopuszczalne stężenie pułapowe (NDSP) – wartość stężenia, które ze względu na zagrożenie zdrowia lub życia nie może być w środowisku pracy przekroczone w żadnym momencie [24].

Filtr – urządzenie, w którym zachodzi osadzanie cząstek w materiale (medium) porowatym.

Skuteczność zatrzymywania filtru – stosunek liczby lub masy cząstek zatrzymanych przez filtr do całkowitej liczby lub masy cząstek wprowadzonych do filtru, zwykle wyrażana w procentach [41].

Środki ochrony zbiorowej przed czynnikami szkodliwymi – środki przeznaczone do jednoczesnej ochrony grupy osób przed szkodliwymi czynnikami w środowisku pracy, będące rozwiązaniami technicznymi, stosowanymi w pomieszczeniach pracy, maszynach i urządzeniach [23].

Środki ochrony indywidualnej przed pyłami – środki noszone lub trzymane przez pracownika w celu ochrony przed szkodliwymi pyłami w środowisku pracy, w tym – wszystkie akcesoria i dodatki przeznaczone do tego celu [23].

Wentylacja pomieszczenia – wymiana powietrza w pomieszczeniu lub w jego części, mająca na celu usunięcie powietrza zużytego i zanieczyszczonego oraz wprowadzenie powietrza zewnętrznego [20].

Rozdział powietrza w pomieszczeniu – rozdział powietrza w wentylowanej przestrzeni z zastosowaniem nawiewników i wywiewników w celu zagwarantowania wymaganych warunków – intensywności wymiany powietrza, ciśnienia, czystości, temperatury, wilgotności względnej, prędkości ruchu powietrza w strefie przebywania ludzi [20].

Wentylacja mechaniczna – wentylacja będąca wynikiem działania urządzeń mechanicznych lub strumienicowych, wprowadzających powietrze w ruch [20].

Wentylacja mechaniczna ogólna – wentylacja całego pomieszczenia lub zespołu pomieszczeń.

Wentylacja mechaniczna miejscowa – wentylacja określonej przestrzeni w pomieszczeniu, stanowiska pracy lub urządzenia produkcyjnego.

Urządzenie filtracyjno-wentylacyjne – urządzenie przeznaczone do odciągania powietrza ze stanowiska pracy i jego oczyszczania.

7. Piśmiennictwo

1. ACGIH: *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs)*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio 1995, 1996, 1997, 1998, 2000, 2001.
2. Bai Y., Suzuki A.K., Sagai M.: *The cytotoxic effects of Diesel exhaust particles on human pulmonary artery endothelial cells in vitro: role of active oxygen species*. *Free Radical Biology and Medicine* 2001, 30 (5), 555-562.
3. Bao L., Chen S., Wu L., Hei T.K., Wu Y., Yu Z., Xu A.: *Mutagenicity of diesel exhaust particles mediated by cell-particle interaction in mammalian cells*. *Toxicology*, 2007, 229, 91-100.
4. Cantrell B.K., Watts W.F.: *Diesel Exhaust Aerosol: Review of Occupational Exposure Appl. Occup. Environ. Hyg.* 1997, 12(12), 1019-1027.
5. Desantes J.M., Margot X., Gil A., Fuentes E.: *Computational study on the deposition of ultrafine particles from Diesel exhaust aerosol*. *Aerosol Science*, 2006, 37, 1750 – 1769.
6. Health Effects Institute: *Diesel exhaust: A critical analysis of emissions, exposure and health effects. A Special Report of the Institute's Diesel Working Group*. Cambridge, UK, 1995, pp. 294-296.
7. IARC: *Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*. Vol. 46. Lyon 1989, 41-185.
8. Jankowska E., Jankowski T., Kondej D.: *Badanie obszarów wentylowanych i niewentylowanych w pomieszczeniach pracy*. *Bezpieczeństwo Pracy* 2003, nr 1, s. 17-19.
9. Leberchert G., Czerczak S.: *Spaliny silnika Diesla*. W: *Wytyczne szacowania ryzyka zdrowotnego dla czynników rakotwórczych*. Z. 6. Łódź, IMP 1997, s. 42-84.
10. Li R., Ning Z., Cui J., Khalsa B., Ai L., Takabe W., Beebe T., Majumdar R., Sioutas C., Hsiai T.: *Ultrafine particles from diesel engines induce vascular oxida-*

tive stress via JNK activation. Free Radical Biology and Medicine 2009, 46, 775–782.

11. Mark D.: *Occupational Exposure to Nanoparticles and Nanotubes*. Environmental Science and Technology 2007, 24, 50-80.
12. Matti Maricq M.: *Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines*. J. Aerosol Science 2007, 38, 1079-1118.
13. Merkisz J.: *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*. Poznań, Wyd. Pol. Poznańskiej 1997.
14. Mierzwiński S. i in.: *Kształtowanie przepływów powietrza wentylacji ogólnej i miejscowej dla ograniczenia narażenia pracowników na pyły w pomieszczeniach przemysłowych*. Zadanie badawcze nr II-5.04, zrealizowane w ramach wieloletniego programu pn.: Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej. Gliwice, Politechnika Śląska 2004 [Praca niepublikowana].
15. Mundandhara S.D., Becker S., Madden M.C.: *Effects of diesel exhaust particles on human alveolar macrophage ability to secrete inflammatory mediators in response to lipopolysaccharide*. Toxicology in Vitro (2006) 20, 614–624.
16. NIOSH: *Manual of Analytical Methods (NMAM): Method 5040 - Elemental Carbon (Diesel particulates)*. Fourth Edition. Cincinnati, National Institute of Occupational Safety and Health, 1998.
17. Park S., Nam H., Chung N., Park J.-D., Lim Y.: *The role of iron reactive oxygen species generation from diesel exhaust particles*. Toxicology in Vitro 2006, 20, 851-857.
18. Sioutas C.: *Development of New Generation Personal Monitors for Fine Particulate Matter (PM) and its Metal Content*. NUATRC Research Report, 2004, 2.
19. Świdwińska-Gajewska A.M.: *Nanocząstki (cz. 1) – Produkt nowoczesnej technologii i nowe zagrożenie w środowisku pracy*. Medycyna Pracy 2007, 58 (3), 243.

20. *Warunki techniczne wykonania i odbioru instalacji wentylacyjnych. Wymagania techniczne COBRTI INSTAL*. COBRTI INSTAL i Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie” 2002, z. 5.
21. *Dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki jakości energetycznej budynków*. DzU WE L 4.1.2003, 1/65.
22. *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*. DzU nr 75, poz. 690, ze zm.
23. *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy*. [tj.] DzU 2003, nr 169, poz. 1650, ze zm.
24. *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. DzU nr 217, poz. 1833, ze zm.
25. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 marca 2008 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu*. DzU nr 47, poz. 281.
26. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 30 grudnia 2004 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy związanej z występowaniem w miejscu pracy czynników chemicznych*. DzU 2005 nr 11, poz. 86.
27. *Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane*. [tj.] DzU 2006, nr 156, poz. 1118, ze zm.
28. *Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 12 marca 1996 r. w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi*. Mon. Pol. nr 19, poz. 231.
29. *ISO/TR 27628:2007 Workplace atmospheres – Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols – Inhalation exposure characterization and assessment*.
30. *PN-EN 143:2004/A1:2007 Sprzęt ochrony układu oddechowego – Filtry – Wymagania, badanie, znakowanie*.

31. PN-EN 149+A1:2009 *Sprzęt ochrony układu oddechowego – Półmaski filtrujące do ochrony przed cząstkami – Wymagania, badanie, znakowanie.*
32. PN-EN 405:2005 *Sprzęt ochrony układu oddechowego – półmaski pochłaniające lub filtrującepochłaniające z zaworami – Wymagania, badanie, znakowanie.*
33. PN-EN 405+A1:2009 *Sprzęt ochrony układu oddechowego – Półmaski pochłaniające lub filtrującepochłaniające z zaworami – Wymagania, badanie, znakowanie.*
34. PN-EN 689:2002 *Powietrze na stanowiskach pracy. Wytyczne oceny narażenia inhalacyjnego na czynniki chemiczne przez porównanie z wartościami dopuszczalnymi i strategia pomiarowa.*
35. PN-EN 779:2005 *Przeciwpyłowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Określanie parametrów filtracyjnych.*
36. PN-EN 1822-1:2009 *Wysoko skuteczne filtry powietrza (HEPA i ULPA). Część 1. Klasyfikacja, badanie parametrów, znakowanie.*
37. PN-EN 12599:2002 *Wentylacja budynków. Procedury badań i metody pomiarowe dotyczące odbioru wykonanych instalacji wentylacji i klimatyzacji.*
38. PN-EN 12942:2002/A2:2008 *Sprzęt ochrony układu oddechowego – Oczyszczający sprzęt ze wspomaganie przepływu powietrza wyposażony w maski, półmaski lub ćwierćmaski – Wymagania, badanie, znakowanie.*
39. PN-EN 14387+A1:2008 *Sprzęt ochrony układu oddechowego – Pochłaniacze i filtropochłaniacze – Wymagania, badanie, znakowanie.*
40. PN-EN 14530:2005 *Powietrze na stanowiskach pracy. Oznaczanie cząstek wydzielanych przez silnik wysokoprężny. Wymagania ogólne.*
41. PN-ISO 4225:1999. *Jakość powietrza. Zagadnienia ogólne. Terminologia.*
42. PN-ISO 4225/Ak:1999 *Jakość powietrza. Zagadnienia ogólne. Terminologia.*
43. PN-Z-04008-7:2002 i PN-Z-04008-7:2002/Az1:2004 *Ochrona czystości powietrza. Pobieranie próbek. Zasady pobierania próbek powietrza w środowisku pracy i interpretacji wyników.*

44. PN-91/Z-04020/02 *Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości węgla elementarnego. Oznaczanie węgla elementarnego w powietrzu w pyłe atmosferycznym (emisja) metodą chromatografii gazowej.*
45. PN-91/Z-04030/06 *Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pyłu. Oznaczanie pyłu respirabilnego na stanowiskach pracy metodą filtracyjno-wagową.*
46. PN-Z-04240-5:2006 *Ochrona czystości powietrza. Oznaczanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych na stanowiskach pracy metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej.*