

dr inż. ELŻBIETA JANKOWSKA  
 dr MAŁGORZATA POŚNIAK  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy  
 – Państwowy Instytut Badawczy

# Stężenie i rozkład wymiarowy cząstek spalin silników Diesla w powietrzu w garażu

W artykule przedstawiono wyniki badania stężeń i rozkładu wymiarowego cząstek spalin silników Diesla w powietrzu w trzech przypadkach powszechnie występujących podczas prac wykonywanych w garażu. Podano również wyniki badania stężenia masowego w odniesieniu do frakcji wymiarowych cząstek  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1}$ ,  $PM_{0.5}$  i  $PM_{0.25}$ . Badania wykazały, że spaliny z silników Diesla zawierają przede wszystkim cząstki drobne: 95-99% cząstek poniżej 2,5  $\mu m$ ; 91-98% poniżej 1  $\mu m$ ; 87-96% poniżej 0,5  $\mu m$  i 66-77% cząstek poniżej 0,25  $\mu m$ .

## Concentration and size distribution of Diesel fume particles in garage air

This article presents the results of an investigation of the concentrations and size distribution of particles of Diesel fumes suspended in the air in three cases common during work done in a garage. The article also presents the results of an investigation of mass concentrations in relation to size fraction particles  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1}$ ,  $PM_{0.5}$  and  $PM_{0.25}$ . Investigations showed that Diesel fumes contained first of all fine particles: 95-99% particles below 2.5  $\mu m$ , 91-98% below 1  $\mu m$ , 87-96% below 0.5  $\mu m$  and 66-77% particles below 0.25  $\mu m$ .



## Wstęp

Spaliny silników Diesla są powszechnym zanieczyszczeniem powietrza w środowisku pracy i życia. Literatura przedmiotu, w której opisywane są skutki tych zanieczyszczeń zawiera wiele informacji na temat ich emisji i szkodliwego działania na człowieka [1-7]. Z badań naukowych jednoznacznie wynika, że na emitowanych przez silnik Diesla do powietrza drobnych cząstkach mogą się osadzać substancje chemiczne, co może intensyfikować szkodliwe działanie tych cząstek na organizm ludzki. Badania poświęcają również wiele uwagi emisji substancji chemicznych w postaci szkodliwych par i gazów.

## Charakterystyka spalin silników Diesla

Spaliny silników Diesla to wieloskładnikowe mieszaniny kilkuset związków chemicznych powstające w wyniku niedoskonałego spalania oleju napędowego i silnikowego, a także zawartych w nich modyfikatorów i zanie-

czyszczeń. Te niepożądane produkty spalania wydzielają się do atmosfery w postaci gazów i par, jak również cząstek stałych. Tlenki azotu – produkty uboczne spalania, i tlenek węgla – produkt niepełnego spalania to ich główne gazowe składniki. Aerozole spalin silników Diesla zawierają ponad 90% cząstek o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 1  $\mu m$ .

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 (ołów, platynę, glin, wapń, bar) oraz wodę związaną z siarczanami [1-3].

Proporcje pomiędzy węglem pochodzenia organicznego i nieorganicznego w spalinach zależą od bardzo wielu czynników, 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 (DCS) niż rozpuszczalna frakcja organiczna [2].

## Szkodliwość spalin silników Diesla

Dotychczasowe badania toksykologiczne i epidemiologiczne wskazują na działanie rakotwórcze spalin silnika Diesla. Spaliny te zostały uznane przez ekspertów Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC) za czynnik

prawdopodobnie rakotwórczy dla ludzi – grupa 2A [7]. Najwięcej danych potwierdza zależność pomiędzy występowaniem nowotworów złośliwych płuc a narażeniem na te spaliny.

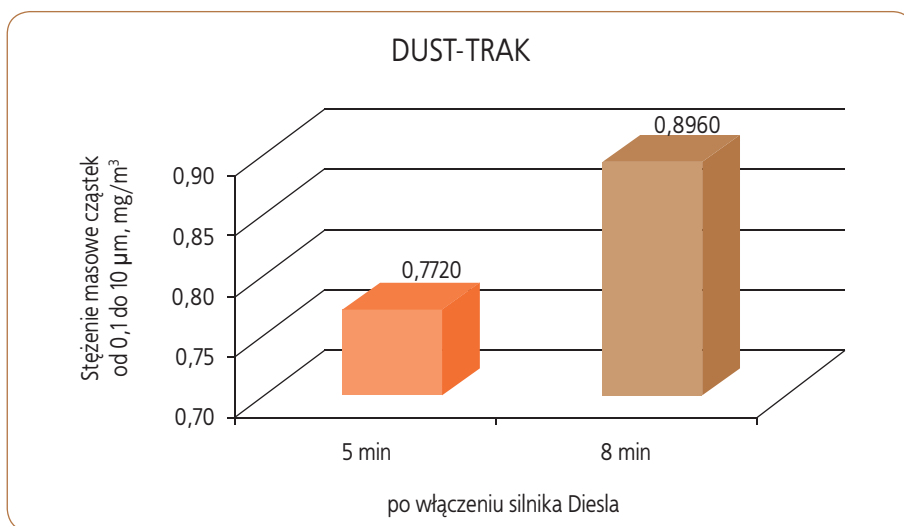
Prawdopodobnie główną przyczyną nowotworów płuc, przede wszystkim gruczolaków i gruczolakoraków, są submikronowe cząstki stałe spalin, na powierzchni których są zaadsorbowane substancje chemiczne, m.in. mutagenne i rakotwórcze, w tym wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i ich nitrowe pochodne rozpuszczalne w rozpuszczalnikach organicznych oraz lipidowych składnikach surfaktantów płucnych ssaków. Cząstki te łatwo wchłaniają się i gromadzą w pęcherzykach płucnych. Również wyniki badań epidemiologicznych wskazują na statystycznie istotne zwiększenie występowania raka pęcherza, raka okrężnicy, odbytnicy i żołądka oraz szpiczaka mnogiego i mięsaka siateczkowo-komórkowego [7].

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.

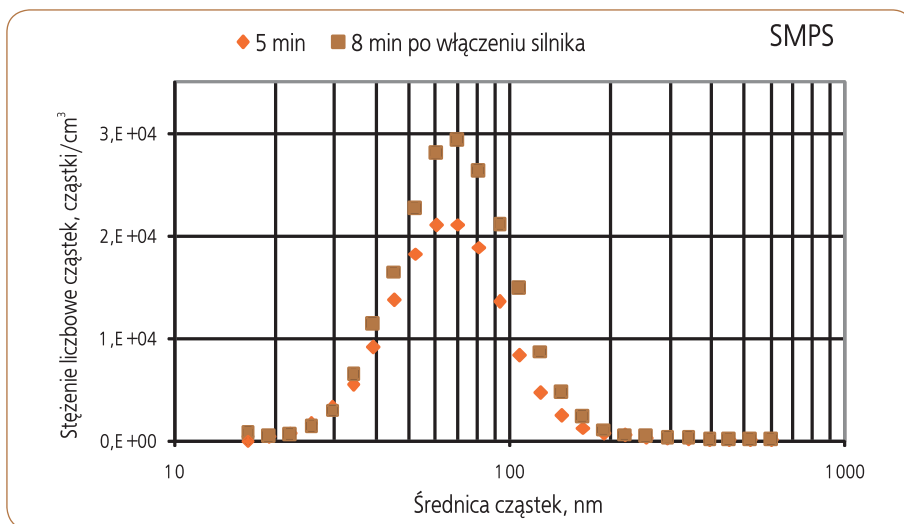
### Cząstki spalin Diesla w powietrzu w garażu

Ze względu na rakotwórcze działanie spalin emitowanych z silników Diesla są one przedmiotem wielu prac badawczych dotyczących analizy ich składu oraz poziomu narażenia różnych grup zawodowych [5, 6, 8, 9, 10].

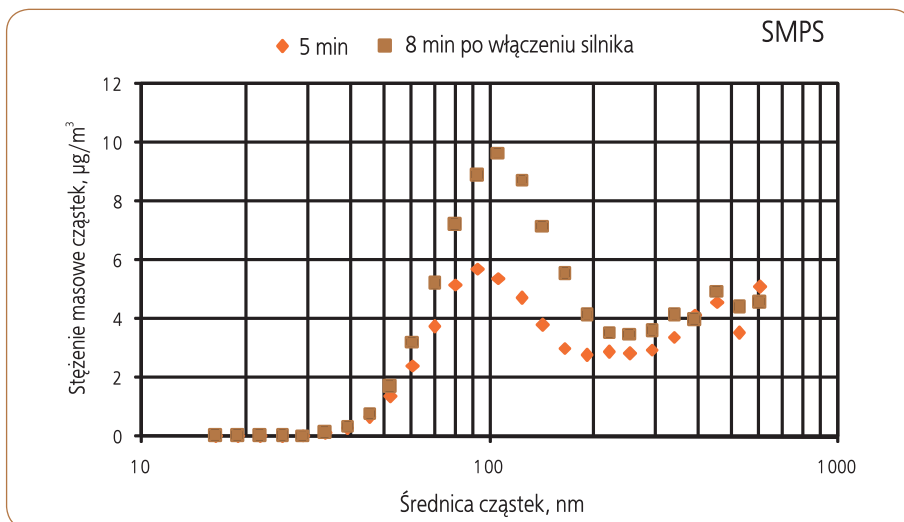
Celem badań przeprowadzonych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym, w zakresie określania parametrów cząstek drobnych emitowanych w spalinach silników Diesla, było oznaczenie ich stężeń masowych i stężeń liczbowych oraz rozkładów wymiarowych cząstek emitowanych podczas trzech scenariuszy (*case study*), które mogą wystąpić na stanowiskach pracy w garażu. Badania zmienności stężeń masowych, stężeń liczbowych i rozkładów wymiarowych cząstek przeprowadzono w garażu o wymiarach: długość 5,6 m, szerokość 5 m i wysokość 3,8 m, przy zamkniętych oknach i drzwiach. Powietrze atmosferyczne mogło się przedostawać do garażu przez nieszczelności w okolicach drzwi. Spaliny były emitowane w odległości ok. 1 m od drzwi garażu. Badania zostały wykonane na wysokości ok. 0,5 m od podłogi i ok. 0,5 m od rury wydechowej, tzn. w jednym z miejsc, w którym może przebywać pracownik wykonujący prace związane z remontem samochodu. Parametry cząstek



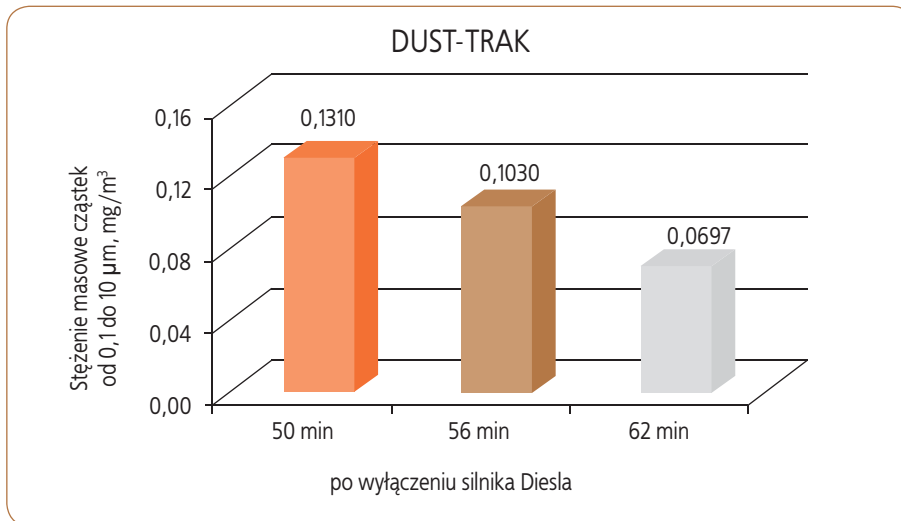
Rys. 1. Stężenie masowe cząstek o wymiarach od 0,1 do 10 µm (DUST-TRAK) w powietrzu w garażu – silnik Diesla włączony  
 Fig. 1. Mass concentration of particles from the 0.1 to 10 µm range (DUST-TRAK) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched on



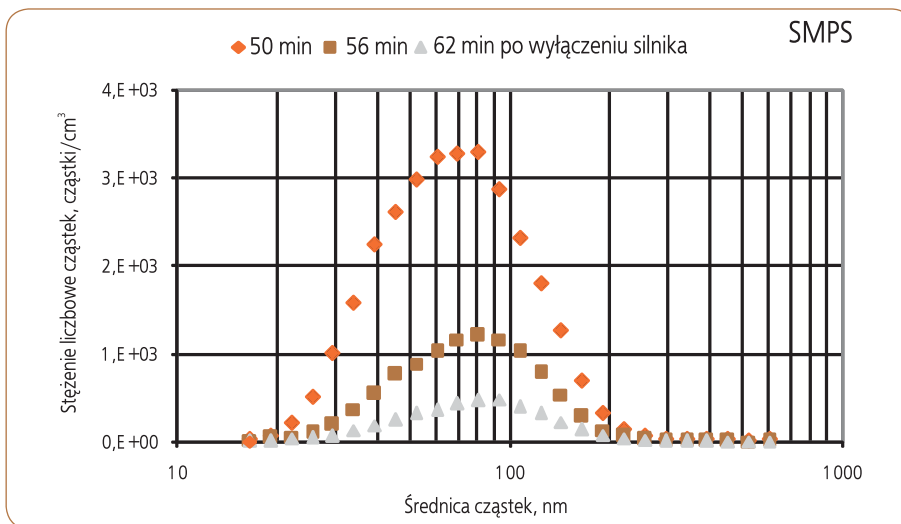
Rys. 2. Stężenie liczbowe cząstek (SMPS) w powietrzu w garażu – silnik Diesla włączony  
 Fig. 2. Number concentration of particles (SMPS) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched on



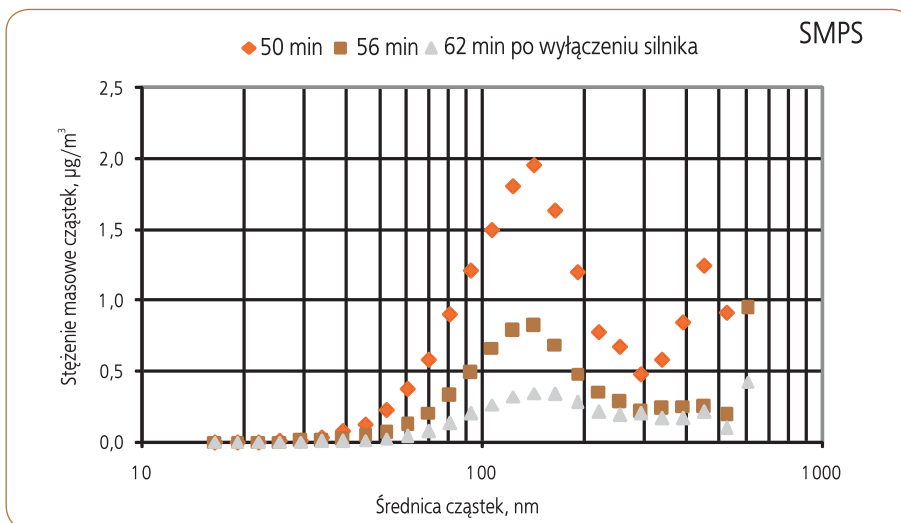
Rys. 3. Stężenie masowe cząstek (SMPS) w powietrzu w garażu – silnik Diesla włączony  
 Fig. 3. Mass concentration of particles (SMPS) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched on



Rys. 4. Stężenie masowe cząstek o wymiarach od 0,1 do 10 µm (DUST-TRAK) w powietrzu w garażu – silnik Diesla wyłączony  
 Fig. 4. Mass concentration of particles from the 0.1 to 10 µm range (DUST-TRAK) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched off



Rys. 5. Stężenie liczbowe cząstek (SMPS) w powietrzu w garażu – silnik Diesla wyłączony  
 Fig. 5. Number concentration of particles (SMPS) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched off



Rys. 6. Stężenie masowe cząstek (SMPS) w powietrzu w garażu – silnik Diesla wyłączony  
 Fig. 6. Mass concentration of particles (SMPS) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched off

określano za pomocą fotometru DUST-TRAK TSI model 8520 oraz systemu analizy wymiarowej cząstek SMPS TSI-CPC model 3022A, DMA MODEL 3080L. Podczas badań kontrolowano również parametry powietrza, takie jak: temperatura, wilgotność i prędkość powietrza (system VIVO Dantec Dynamics).

W **scenariuszu A** badano stężenie i rozkład wymiarowy cząstek drobnych bezpośrednio po włączeniu silnika. W **scenariuszu B** to samo badanie przeprowadzono po 50 minutach od wyłączenia silnika Diesla, natomiast **scenariusz C** badał wspomniane parametry po włączeniu źródła ciepła, w postaci maszyny elektrycznej na stanowisku pracy, na którym wykonywano badania omówione w scenariuszu B. Celem tych badań było zasymulowanie sytuacji, w jaki sposób chwilowe włączenie narzędzi czy urządzeń, które są użytkowane w procesie pracy i mogą być źródłem ciepła, może wpłynąć na stężenie i rozkład wymiarowy cząstek drobnych w powietrzu – badania były prowadzone przy wyłączonym silniku Diesla.

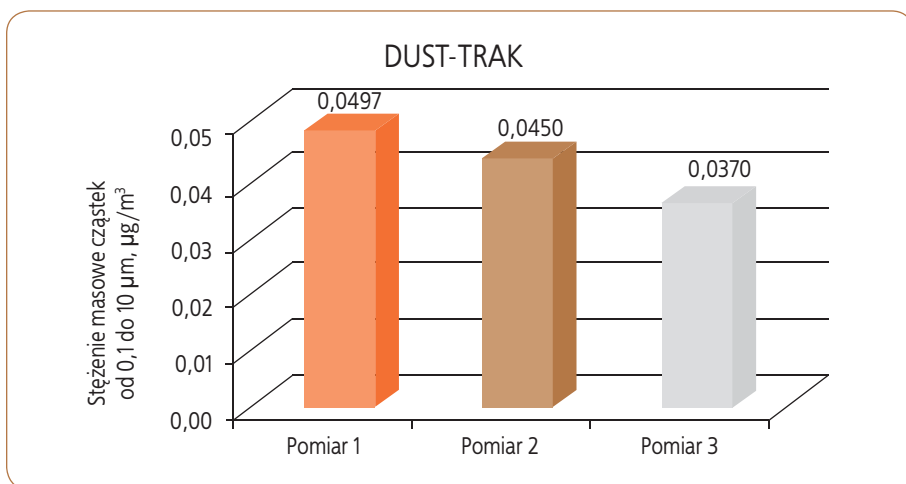
Podczas **scenariusza A** prędkość powietrza wynosiła 0,18-0,50 m/s w wyniku ruchu powietrza spowodowanego wyrzucaniem od powietrza spalin. W **scenariuszu B** prędkość powietrza była mała (0,01-0,04 m/s), co świadczy o warunkach transportu dyfuzyjnego cząstek, natomiast w **scenariuszu C** – pomimo również małych prędkości powietrza (nie przekraczających 0,04 m/s) – występowały warunki transportu konwekcyjnego cząstek, w wyniku włączenia źródła ciepła (maszyny elektrycznej).

**Scenariusz A: Po włączeniu silnika Diesla**

Pomiary wykonano po 5 i 8 minutach po włączeniu silnika. Podczas badań temperatura powietrza wynosiła 20-26 °C i wilgotność względna w zakresie 50-58%. W wyniku analizy danych zaobserwowano wzrost wartości stężeń masowych (rys. 1.) podczas kolejnych pomiarów: z 0,772 do 0,896 mg/m³ oraz wzrost stężeń liczbowych cząstek (rys. 2.), który spowodował znaczny wzrost stężeń masowych, szczególnie dla cząstek o wymiarach 60-190 nm (rys. 3.).

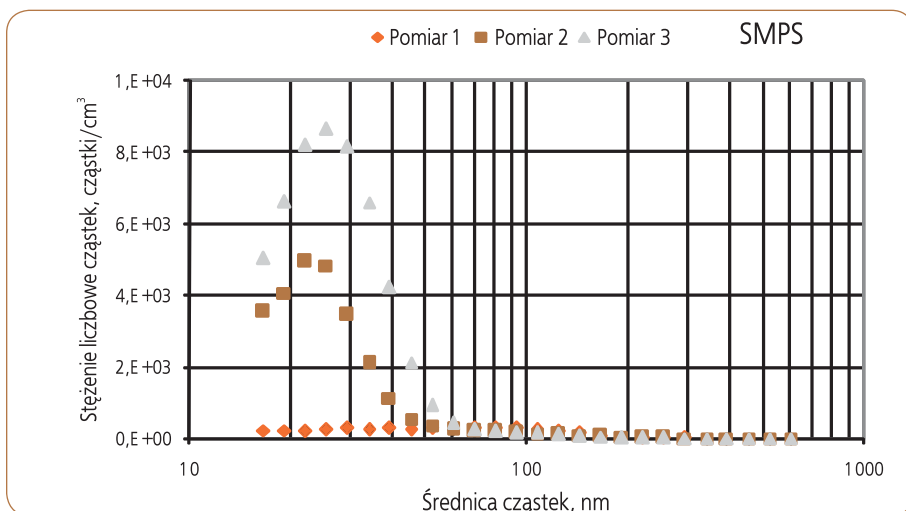
**Scenariusz B: 50 minut po wyłączeniu silnika Diesla**

Pomiary stężeń i rozkładów wymiarowych cząstek wykonano 50 min, 56 min i 62 min po wyłączeniu silnika Diesla. Temperatura powietrza wynosiła ok. 18 °C i wilgotność względna w zakresie 72-74%. Zaobserwowano zmniejszenie się wartości stężeń masowych (rys. 4.) w kolejnych pomiarach z 0,131 do 0,070 mg/m³ oraz spadek stężeń liczbowych cząstek (rys. 5.), który spowodował znaczny spadek stężeń masowych, szczególnie dla cząstek o wymiarach 40-290 nm (rys. 6.).



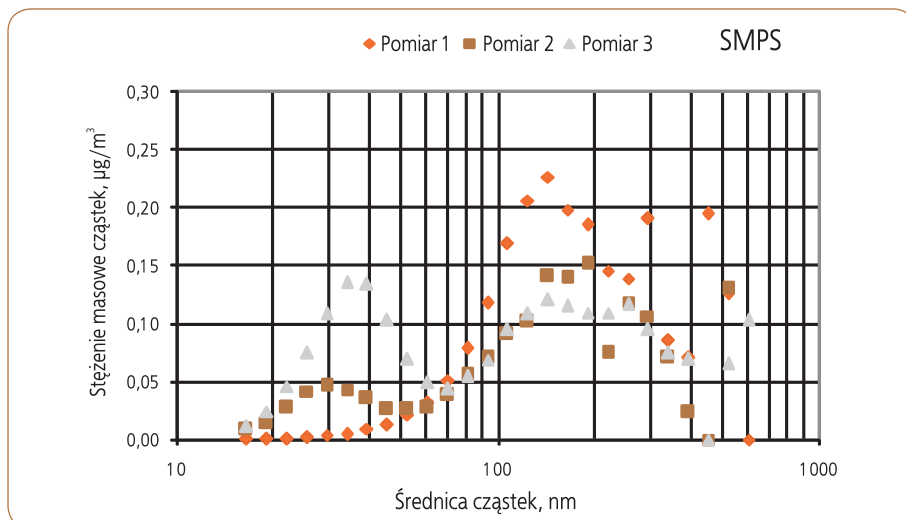
Rys. 7. Stężenie masowe cząstek o wymiarach od 0,1 do 10 µm (DUST-TRAK) w powietrzu w garażu – silnik Diesla wyłączony i włączone źródło ciepła

Fig. 7. Mass concentration of particles from the range 0.1 to 10 µm (DUST-TRAK) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched off and a source of heat switched on



Rys. 8. Stężenie liczbowe cząstek (SMPS) w powietrzu w garażu – silnik Diesla wyłączony i włączone źródło ciepła

Fig. 8. Number concentration of particles (SMPS) suspended in the air of a garage – a Diesel engine switched off and a source of heat switched on



Rys. 9. Stężenie masowe cząstek (SMPS) w powietrzu w garażu – silnik Diesla wyłączony i włączone źródło ciepła

Fig. 9. Mass concentration of particles (SMPS) suspended in the air of the garage – a Diesel engine switched off and a source of heat switched on

**Scenariusz C: Po włączeniu źródła ciepła i bez włączonego silnika Diesla**

Pomiary stężeń i rozkładów wymiarowych cząstek wykonano 21 min po badaniach przeprowadzonych w scenariuszu B. Pomiar 1. wykonano w momencie włączenia źródła ciepła, natomiast pomiary 2. i 3. odpowiednio 6 i 12 minut po włączeniu źródła ciepła – w postaci maszyny elektrycznej. Podczas badań temperatura powietrza wyniosła ok. 19 °C i wilgotność względna – 52-62%. Zaobserwowano zmniejszenie się wartości stężeń masowych w kolejnych pomiarach z 0,0497 do 0,0370 mg/m³ (rys. 7.), natomiast obecność źródła ciepła istotnie wpłynęła na wzrost stężeń liczbowych cząstek (SMPS), przede wszystkim o wymiarach do 40 nm (rys. 8.). Wzrost stężeń liczbowych cząstek w kolejnych pomiarach wpłynął na znaczny wzrost stężeń masowych (rys. 9.), szczególnie dla cząstek o wymiarach do 50 nm (w obszarze cząstek do 100 nm).

Badania stężeń frakcji PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>, PM<sub>0,5</sub> i PM<sub>0,25</sub> w garażu przeprowadzono z zastosowaniem metody grawimetrycznej\*. W celu uzyskania odpowiednich mas pyłów osadzonych na filtrach pomiarowych, próbki pobierano przez 2 godziny przy włączonym silniku Diesla z użyciem 4 zestawów pomiarowych zlokalizowanych w miejscu, w którym przeprowadzono badania metodami optycznymi. Wyniki badań przedstawiono w tabeli. Z analizy danych wynika, że stężenia masowe określone metodą filtracyjną zawierały się dla badanych frakcji w zakresach: 1,2099-1,4179 mg/m³ (PM<sub>10</sub>); 1,1523-1,4013 mg/m³ (PM<sub>2,5</sub>); 1,1358-1,3930 mg/m³ (PM<sub>1</sub>); 1,1193-1,3682 mg/m³ (PM<sub>0,5</sub>) i 0,8313-1,0862 mg/m³ (PM<sub>0,25</sub>). Spaliny z silników Diesla zawierały przede wszystkim cząstki drobne, na co wskazują udziały procentowe w odniesieniu do frakcji PM<sub>10</sub>.

**Podsumowanie**

Badania wykonane metodą optyczną (SMPS) wykazały, że w wyniku spalania olejów napędowych w silnikach Diesla do powietrza w garażu – w warunkach przeprowadzonych badań – były emitowane drobne cząstki, przede wszystkim o wymiarach poniżej 200 nm. Po wyłączeniu silnika Diesla, cząstki te nadal przebywały w stanie zawieszonym w powietrzu i mogły zagrażać osobom pracującym i przebywającym w garażu. Obecność źródła ciepła wpłynęła na wzrost stężeń cząstek bardzo drobnych zawieszonych w powietrzu, tzn. cząstek o wymiarach poniżej 50 nm. Badania metodą filtracyjną potwierdziły, że spaliny z silników Diesla zawierają przede wszystkim cząstki drobne: 95-99% cząstek poniżej

\* Z użyciem pompki SKC 100-3000 z próbnikami PCIS.

Tabela. Stężenie masowe określone metodą filtracyjną z użyciem pompki SKC z próbnikami PCIS do pomiaru frakcji  $PM_{10}$ ;  $PM_{2,5}$ ;  $PM_1$ ;  $PM_{0,5}$  i  $PM_{0,25}$

Table. Mass concentration determined with the filtration method with SKC pumps and PCIS samplers for measuring fractions  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ;  $PM_1$ ;  $PM_{0,5}$  and  $PM_{0,25}$

| Nr próbki / rodzaj próbki | Czas pomiaru | Frakcje pyłu | Stężenie pyłu, mg/m <sup>3</sup> | Udział % w odniesieniu do frakcji $PM_{10}$ |
|---------------------------|--------------|--------------|----------------------------------|---|
| D-1/PCIS                  | 2 h          | $PM_{10}$    | 1,3580                           | –   |
|                           |              | $PM_{2,5}$   | 1,3251                           | 98  |
|                           |              | $PM_1$       | 1,2675                           | 93  |
|                           |              | $PM_{0,5}$   | 1,2263                           | 90  |
|                           |              | $PM_{0,25}$  | 0,9383                           | 69  |
| D-2/PCIS                  | 2 h          | $PM_{10}$    | 1,4179                           | –   |
|                           |              | $PM_{2,5}$   | 1,4013                           | 99  |
|                           |              | $PM_1$       | 1,3930                           | 98  |
|                           |              | $PM_{0,5}$   | 1,3682                           | 96  |
|                           |              | $PM_{0,25}$  | 1,0862                           | 77  |
| D-3/PCIS                  | 2 h          | $PM_{10}$    | 1,2099                           | –   |
|                           |              | $PM_{2,5}$   | 1,1523                           | 95  |
|                           |              | $PM_1$       | 1,1358                           | 94  |
|                           |              | $PM_{0,5}$   | 1,1193                           | 93  |
|                           |              | $PM_{0,25}$  | 0,8642                           | 71  |
| D-4/PCIS                  | 2 h          | $PM_{10}$    | 1,2593                           | –   |
|                           |              | $PM_{2,5}$   | 1,2263                           | 97  |
|                           |              | $PM_1$       | 1,1440                           | 91  |
|                           |              | $PM_{0,5}$   | 1,0947                           | 87  |
|                           |              | $PM_{0,25}$  | 0,8313                           | 66  |

2,5  $\mu$ m, 91-98% poniżej 1  $\mu$ m, 87-96% poniżej 0,5  $\mu$ m i 66-77% cząstek poniżej 0,25  $\mu$ m.

Z uwagi na swój wymiar oraz długotrwały okres przebywania w stanie zawieszonym w powietrzu, cząstki drobne spalin mogą przedostawać się do układu oddechowego człowieka,

przede wszystkim do pęcherzyków płucnych i być przyczyną chorób pracowników.

PIŚMIENNICTWO

[1] J. Merkisz *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*. WPP, Poznań, 1997

[2] G. Lebrecht, S. Czerczak, W. Hanke, W. Szymczak *Spaliny silnika Diesla. Wytyczne szacowania ryzyka zdrowotnego dla czynników rakotwórczych*. Zeszyt 6, IMP, Łódź 1997, s. 41-83

[3] M. Pośniak *Spaliny silników Diesla – zasady i metody oceny narażenia zawodowego*. „Medycyna Pracy”, 2003, 54 (4), s. 389-393

[4] M. E. Brich, r.A. Cary *Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposure to Particulate Diesel Exhaust*, “Aerosol Science and Technology”, 1996, vol. 25, p. 221-241

[5] M. Pośniak, I. Makhniashvili, E. Kozieł, J. Kowalska *Narażenie zawodowe kierowców wózków widłowych na spaliny silników Diesla*. „Bromatologia i Chemia Toksykologiczna”, 2002, nr 2(XXXV), s. 187-193

[6] M. Pośniak, I. Makhniashvili, E. Kozieł, J. Kowalska *Occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons during Diesel combustion*, “JOSE”, 2003, vol. 9, no 1, p. 17-26

[7] *Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes*. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Lyon 1989, v. 46, p. 41-185

[8] S. Dridi, M.R. Driss, S. Sabbah, M.L. Bouguerra *Determination of Aromatic Hydrocarbons in Airborne Diesel Exhaust Particulates by HPLC with UV Detection and Wavelength Programming*. “J. Liq. Chrom. & Rel. Technol.”, 1998, 21 (4), 475-489

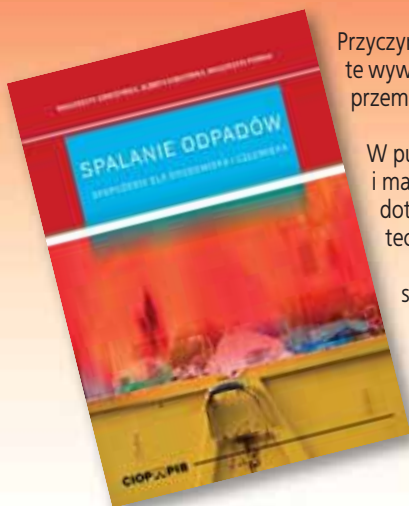
[9] P. J. Tancell, M. M. Rhead, r. D. Pemberton, J. Braven *Survival of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during Diesel Combustion*. “Environmental Society & Technology”, 1995, 29, p. 2871-2876

[10] M. Tavares, J. P. Pinto et al. *Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from diesel engine in a bus station*, Atmospheric Environment, Londrina, Brazil 2004, v. 38, p. 5039-5044, 2004

*Publikacja przygotowana na podstawie wyników uzyskanych 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.*

## Spalanie odpadów – zagrożenia dla środowiska i człowieka

Małgorzata Szewczyńska, Elżbieta Dobrzyńska, Małgorzata Pośniak



Przyczyną niekontrolowanego spalania odpadów jest przede wszystkim mała świadomość zagrożeń, które procesy te wywołują. Spalane substancje mogą ulegać różnym przemianom biochemicznym i termicznym, a produkty tych przemian – negatywnie oddziaływać na środowisko naturalne, a także środowisko pracy i życia.

W publikacji przedstawiono negatywne skutki niekontrolowanego spalania odpadów, tj. różnego rodzaju paliw i materiałów oraz śmieci w paleniskach domowych. Omówiono także obowiązujące w Polsce przepisy prawne dotyczące emisji spalin i zalecenia dla odpowiednich instytucji ochrony środowiska, które mogą pomóc w skutecznym ograniczaniu emisji produktów spalania odpadów.

stron: 28, cena 10 zł

**Sprzedaż prowadzi i zamówienia przyjmuje:**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
00-701 Warszawa, ul. Czerniakowska 16  
tel.: 22 623 36 98, fax: 22 623 36 93  
www.ciop.pl, e-mail: kancelaria@ciop.pl