

Małgorzata Szewczyńska
Elżbieta Dobrzyńska
Joanna Kowalska
Małgorzata Pośniak
Paweł Wasilewski

Zagrożenia związane z narażeniem na węgiel elementarny i tlenek azotu emitowane w spalinach silnika Diesla



Fot. Testowanie kolejki podwieszanej w wyrobisku górnicy (fot. własna)

Opracowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Zadanie nr 3.ZS.07 pt. „Ocena narażenia na spaliny emitowane z silników Diesla w wybranych gałęziach przemysłu górnictwa i budownictwa podziemnego uwzględniające nowe wartości NDS”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.





Co emitują silniki Diesla?

Fot. Samochody emitujące spaliny
(Grafika wygenerowana przez
Sztuczną Inteligencję)

Silniki Diesla podczas pracy emitują **złożoną mieszaninę substancji, w tym cząstek stałych, aerozoli ciekłych, par i gazów** powstających w wyniku spalania oleju napędowego. Cząstki stałe (sadza) (DPM) składają się z rdzenia z węgla elementarnego, na którego powierzchni adsorbują się związki organiczne, siarczany, metale i różne inne substancje, np. rakotwórcze wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Gazowa część emisji obejmuje tlenek i ditlenek węgla, tlenki azotu oraz lotne i półlotne związki organiczne (LZO i PLZO), które również mogą osadzać się na powierzchni cząstek stałych.

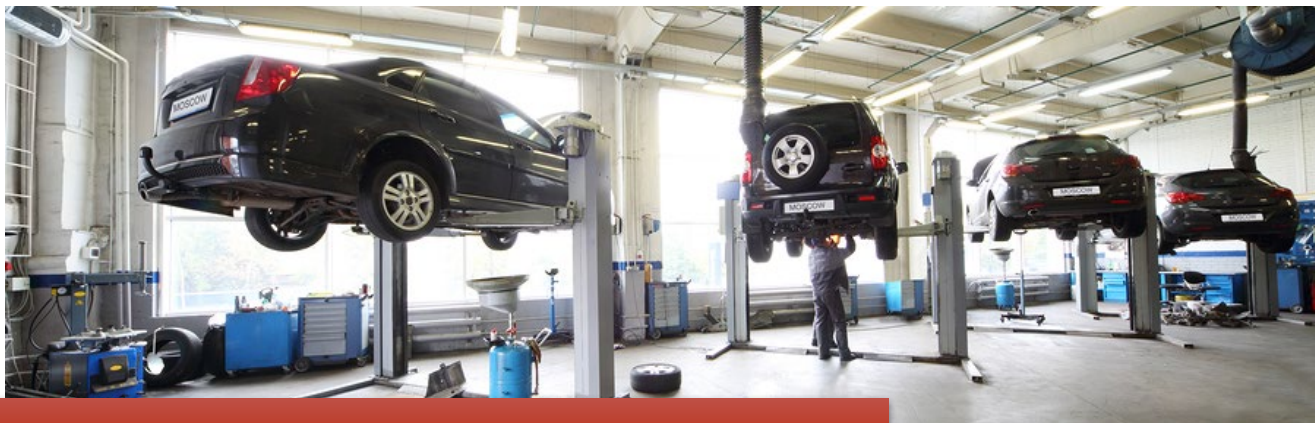
Zarówno skład tych spalin, rozkład wielkości cząstek i skład chemiczny DPM, jak i ilość spalin uwalnianych do środowiska mogą się znacznie różnić w zależności od: właściwości paliwa i olejów smarowych, technologii i wieku silnika, posiadanych systemów redukcji emisji spalin, prędkości roboczej silnika, temperatury silnika, warunków konserwacji i ustawień silnika oraz od tego, czy pracuje on na biegu jałowym, przy niskim obciążeniu czy na pełnej mocy.

Spis treści

- Co emitują silniki Diesla?
- Narażenie zawodowe na SSD
- Wpływ na zdrowie
- Wyniki badań i ocena narażenia
- Czynniki wpływające na poziom stężeń spalin w środowisku pracy
- Podsumowanie
- Bibliografia

SKŁAD SPALIN SILNIKA DIESLA (SSD)

Grupa składników	Przykładowe związki/substancje	Uwagi
Gazy nieorganiczne	Ditlenek węgla (CO ₂), tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO, NO₂) , ditlenek siarki (SO ₂), wodór (H ₂), amoniak (NH ₃).	Produkty spalania paliwa; część z nich (NO, CO) jest toksyczna przy niskim stężeniu.
Lotne związki organiczne (LZO)	Formaldehyd, acetaldehyd, benzen, toluen, aceton.	Często obecne w niskich stężeniach, mogą mieć działanie rakotwórcze.
Półlotne związki organiczne (PLZO)	WWA: benzo(a)piren, naftalen, antracen, fenantren.	Występują głównie na powierzchni cząstek sadzy; niektóre to substancje rakotwórcze.
Cząstki stałe (sadza)	Węgiel elementarny (EC) , węgiel organiczny (OC), popiół, siarczany, azotany.	Główna frakcja stała w spalinach; nośnik zanieczyszczeń organicznych i metali.
Metale ciężkie	Kadm (Cd), ołów (Pb), chrom (Cr), nikiel (Ni), cynk (Zn).	Pochodzą z paliwa, oleju lub ścierania części silnika.
Inne związki toksyczne	Nitrozaminy, diole epoksydowe, związki chlorowcopochodne.	Występują w niewielkich ilościach; niektóre są silnie toksyczne lub mutagenne.



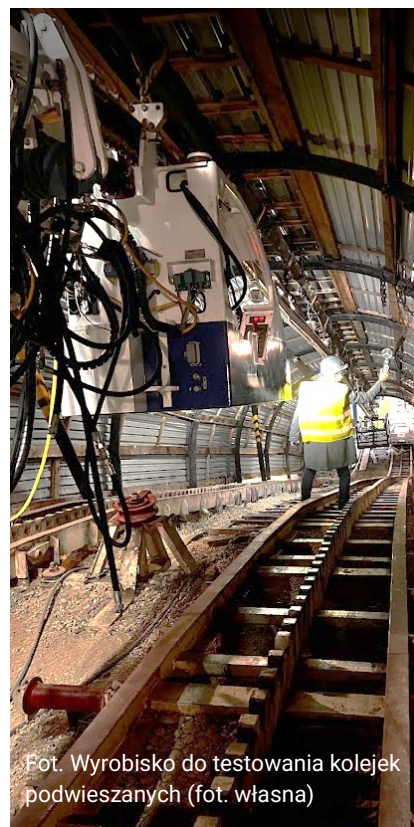
Narażenie zawodowe na SSD

Fot. Serwis samochodowy
(Paha_L/Bigstockphoto)

W środowisku pracy narażenie na SSD, w tym EC i NO, może występować m.in. podczas: konserwacji pojazdów z silnikiem Diesla w serwisach obsługi maszyn roboczych, wózków widłowych, lokomotyw spalinowych i podwieszanych kolejek spalinowych stosowanych w górnictwie oraz sprzętu budowlanego, zwłaszcza w przestrzeniach zamkniętych lub słabo wentylowanych. Narażenie zawodowe na spaliny silników wysokoprężnych może wystąpić w wielu różnych środowiskach pracy, w tym: w górnictwie, rolnictwie, budownictwie i transporcie, zarówno kolejowym, drogowym, lotniczym, jak i morskim.

Głównymi czynnikami wpływającymi na narażenie pracowników na SSD są rodzaj i liczba używanych silników wysokoprężnych, ich moc, prędkość robocza, miejsce pracy – na zewnątrz lub wewnątrz pomieszczeń – oraz, w tym drugim przypadku, skuteczność wentylacji.

Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) sklasyfikowała spaliny emitowane z silników Diesla jako czynnik rakotwórczy dla ludzi (grupa 1). Z tego względu, zgodnie z przepisami krajowymi, spaliny te uznawane są za czynnik o działaniu rakotwórczym w środowisku pracy, co nakłada na pracodawców obowiązki związane z oceną ryzyka, prowadzeniem pomiarów (np. węgla elementarnego) oraz stosowaniem odpowiednich środków ochrony.



Fot. Wyrobisko do testowania kolejek podwieszanych (fot. własna)

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 26 lipca 2024 r. w sprawie substancji chemicznych, ich mieszanin, czynników lub procesów technologicznych o działaniu rakotwórczym, mutagennym lub reprotoksycznym w środowisku pracy (Dz.U. z 2024 r., poz. 1126) **prace związane z narażeniem na spaliny emitowane z silników Diesla są sklasyfikowane jako procesy technologiczne, w których dochodzi do uwalniania substancji chemicznych, ich mieszanin lub czynników o działaniu rakotwórczym lub mutagennym.**

INNE ŹRÓDŁA NARAŻENIA

Węgiel elementarny

- spalanie węgla i biomasy,
- przemysł metalurgiczny i energetyczny,
- zakłady produkcyjne i przemysłowe.

Tlenek azotu

- emisje z kotłowni, pieców i turbin gazowych,
- przemysł chemiczny,
- dym tytoniowy.

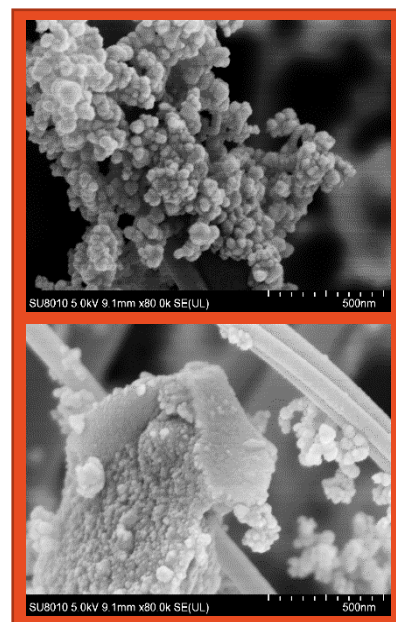
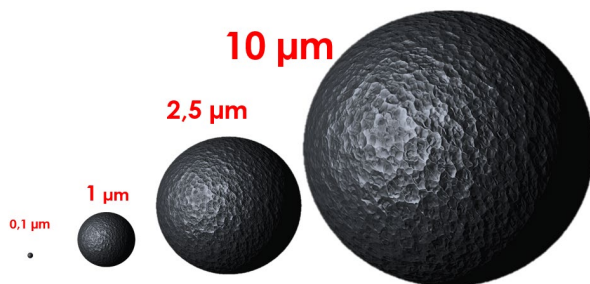


Wpływ na zdrowie

Fot. SciePro/Bigstockphoto

Zdefiniowanie pojęcia **CZĄSTEK STAŁYCH** jest trudne, ponieważ nie mają one jednolitych właściwości fizycznych ani chemicznych. Różnią się wielkością, kształtem i składem – stanowią mieszaninę wielu związków chemicznych. Niektóre, jak cząstki sadzy, są na tyle duże i ciemne, że można je dostrzec gołym okiem. Inne są mikroskopijne i wymagają użycia mikroskopu elektronowego do ich wykrycia.

Największe zagrożenie dla zdrowia człowieka stanowią właśnie te najmniejsze cząstki DPM. Ich aerodynamiczna średnica decyduje o zdolności przenikania do organizmu i gromadzenia się w jego wnętrzu. Szczególnie niebezpieczne są cząstki o średnicy mniejszej niż 10 mikrometrów (PM10), które z łatwością docierają do dolnych partii układu oddechowego, osiadają w pęcherzykach płucnych, a następnie mogą przenikać do krwiobiegu i układu nerwowego.



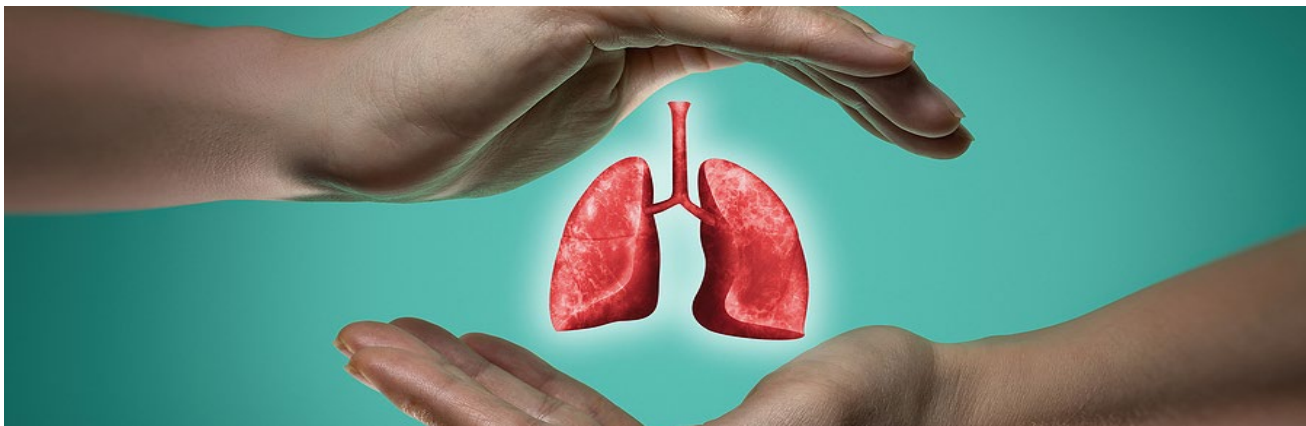
Fot. Obraz SEM powierzchni filtra
Morfologia DPM (fot. własna)

KRÓTKOTRWALE (OSTRE) NARAŻENIE
na **wysokie stężenia spalin z silników Diesla**
może powodować:

- podrażnienie dróg oddechowych i oczu,
- bóle i zawroty głowy,
- nudności i objawy zapalenia dróg oddechowych, które różnią się w zależności od osoby i mają charakter przejściowy.

DŁUGOTRWALE (PRZEWLEKŁE)
narażenie na spaliny Diesla może powodować:

- zapalenie płuc,
- zaostrzenie reakcji alergicznej,
- choroby układu krążenia,
- zmiany czynnościowe i morfologiczne w układzie oddechowym,
- kumulację cząstek stałych w makrofagach,
- zmiany w komórkach płuc,
- zwłóknienie i metaplastię nabłonka,
- raka płuc.



Fot. SvetaZi/Bigstockphoto

TLENEK AZOTU (NO), będący jednym z tlenków azotu, jest bezbarwnym gazem, który w warunkach środowiskowych łatwo utlenia się do ditlenku azotu (NO_2). Oba związki są toksyczne i drażniące dla układu oddechowego, ale **NO** sam w sobie również może stanowić zagrożenie dla zdrowia – zwłaszcza przy narażeniu zawodowym, np. w garażach, tunelach, warsztatach lub miejscach pracy, gdzie obecne są spaliny silników wysokoprężnych i benzynowych.



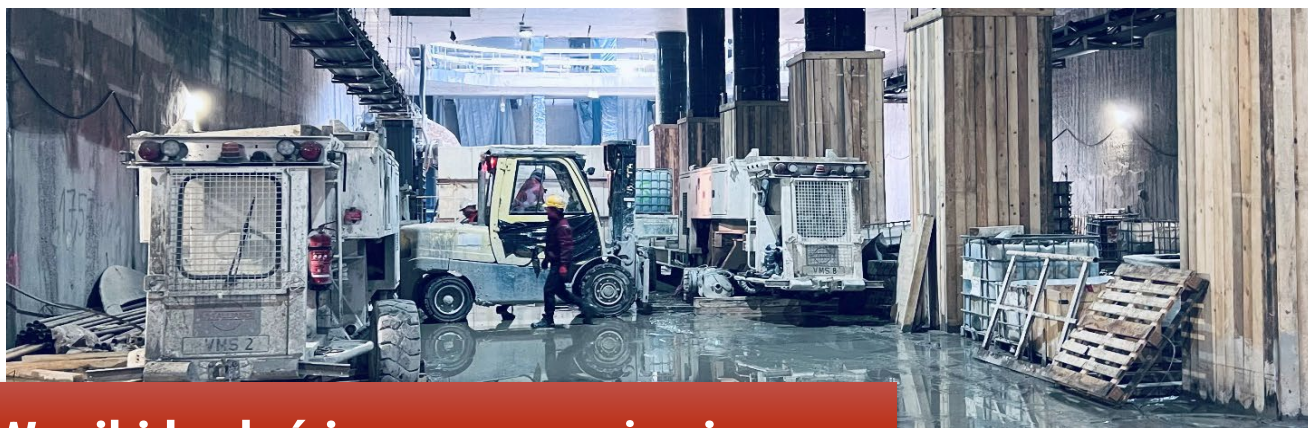
Fot. Gladkov/Bigstockphoto

DŁUGOTRWAŁE (PRZEWLEKŁE) narażenie na wysokie stężenia NO może powodować:

- podrażnienie dróg oddechowych – kaszel, duszność, uczucie ucisku w klatce piersiowej,
- skurcz oskrzeli – może wystąpić szczególnie u osób z astmą lub nadreaktywnością oskrzeli,
- obrzęk płuc (przy bardzo wysokim stężeniu) – może rozwijać się z opóźnieniem nawet do 24 godzin po ekspozycji, prowadząc do poważnych zaburzeń oddychania,
- zaburzenia pracy serca i krążenia – zwłaszcza u osób z chorobami układu sercowo-naczyniowego,
- methemoglobinemię (rzadziej) – przy jednoczesnej obecności innych tlenków azotu, ograniczenie zdolności hemoglobiny do transportu tlenu.

DŁUGOTRWAŁE (PRZEWLEKŁE) narażenie na niskie stężenia NO może powodować:

- przewlekłe zapalenie oskrzeli i inne choroby układu oddechowego – nawracające infekcje, uporczywy kaszel, pogorszenie wydolności oddechowej,
- zaostrzenie astmy i POChP – częstsze objawy i zwiększona potrzeba leczenia,
- zwiększone ryzyko chorób układu krążenia – stres oksydacyjny i stan zapalny mogą nasilać choroby sercowo-naczyniowe,
- zaburzenia funkcji poznawczych i układu nerwowego – sugerowany związek z pogorszeniem funkcji poznawczych, choć wymaga dalszych badań.



Wyniki badań i ocena narażenia

Fot. Maszyny pracujące w tunelu podziemnym (fot. własna)

W ramach V i VI etapu programu wieloletniego w latach 2020-2025 prowadzono badania i pomiary spalin z silników Diesla mierzonych jako węgiel elementarny.

W ramach projektu, zadania oraz badań w zakresie akredytacji przeprowadzono pomiary na ponad 1400 stanowiskach pracy, gdzie wykorzystywane i obsługiwane są pojazdy z silnikiem Diesla.

Projekt badawczy realizowany w ramach V etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Zadanie realizowane w ramach VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.

Badaniami objęte były stanowiska:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • kierowców i mechaników w zajezdniach autobusowych, • mechaników w serwisach samochodowych, • operatorów sprzętu ciężkiego w kopalniach niewęglowych, • operatorów wózków widłowych, • kasjerów i osób obsługujących dystrybutory paliw na stacjach benzynowych, • kierowców zawodowo kierujących samochodami z silnikiem Diesla. | <ul style="list-style-type: none"> • górników i operatorów kolejek spalinowych w kopalniach węgla kamiennego, • operatorów <i>multicarów</i> pracujących podczas drążenia tunelu podziemnego. |
|---|---|

Analiza węgla elementarnego (EC) przeprowadzana była metodą termo-optyczną z wykorzystaniem analizatora termo-optycznego z detekcją płomieniowo-jonizacyjną. Analizator ten umożliwia selektywne oznaczanie węgla elementarnego (EC) oraz węgla organicznego (OC) i całkowitego (TC).

Do oznaczania **tlenku azotu** na badanych stanowiskach pracy zastosowano analizator Dräger X-am® 5000 z trzema czujnikami gazów NO, NO₂ i CO oraz strategią pomiarową zalecaną przy zastosowaniu analizatorów o krótkim czasie pomiarów.



Fot. Analizator EC (fot. własna)



Fot. Zajezdnia autobusowa (fot. własna)

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stężeń węgla elementarnego i tlenu azotu na badanych stanowiskach pracy dokonano oceny narażenia i porównano uzyskane wartości z wartościami dopuszczalnymi (NDS) w odniesieniu do tych czynników.

Zakresy stężeń EC oznaczane na badanych stanowiskach naziemnych

Badani pracownicy	Średnie stężenie EC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Krotność NDS NDS = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	MIN	MAX	
Mechanicy stacji obsługi samochodów A	1,1	8,2	0,02–0,16
Mechanicy stacji obsługi samochodów B	1	3,7	0,02–0,07
Mechanicy stacji obsługi samochodów C1	0,3	14,5	0,006–0,29
Mechanicy stacji obsługi samochodów C2	0,2	18,2	0,004–0,36
Mechanicy w zajezdni autobusowej	0,1	1,6	0,002–0,03
Operatorzy wózków widłowych w hucie	0,3	353,2	0,006–7,06



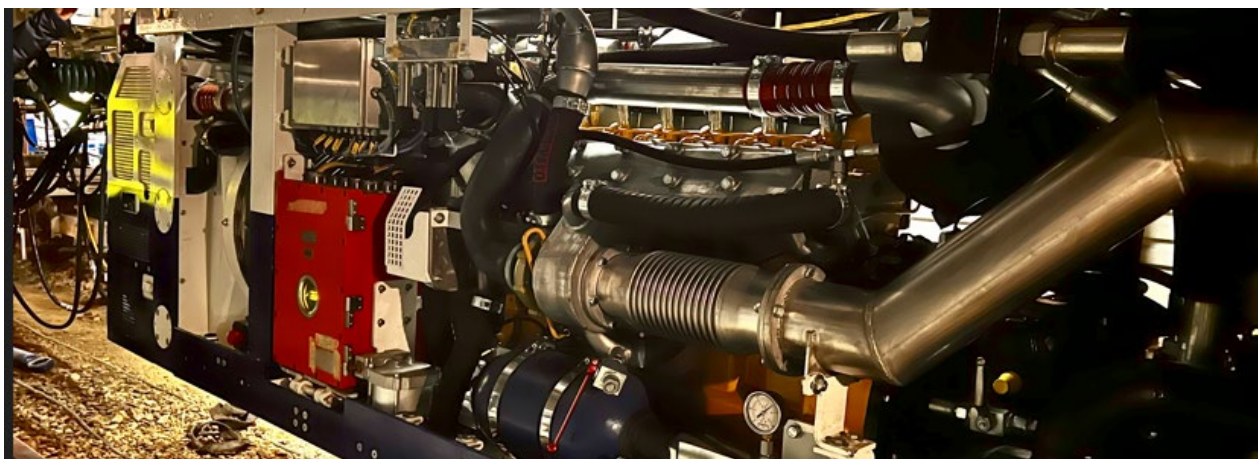
Fot. Serwis samochodowy (Grafika wygenerowana przez Sztuczną Inteligencję)



Fot. Próbnik do pobierania spalin Diesla – kaseta bez impaktora
(fot. <https://leadlab.com/product/37mm-air-sampling-cassette-0-8%C2%B5m-mce-filter-50-pack/>)

Z przebadanych w sumie ok. 1400 naziemnych stanowisk pracy:

- 80% wyników stężenia EC było poniżej $0,001 \text{ mg}/\text{m}^3$, czyli poniżej 0,02 wartości NDS,
- 2% wyników było powyżej 1 wartości NDS,
- 1% wyników było w zakresie 0,5–1 wartości NDS,
- 17% wyników było w zakresie od 0,5–0,1 wartości NDS.



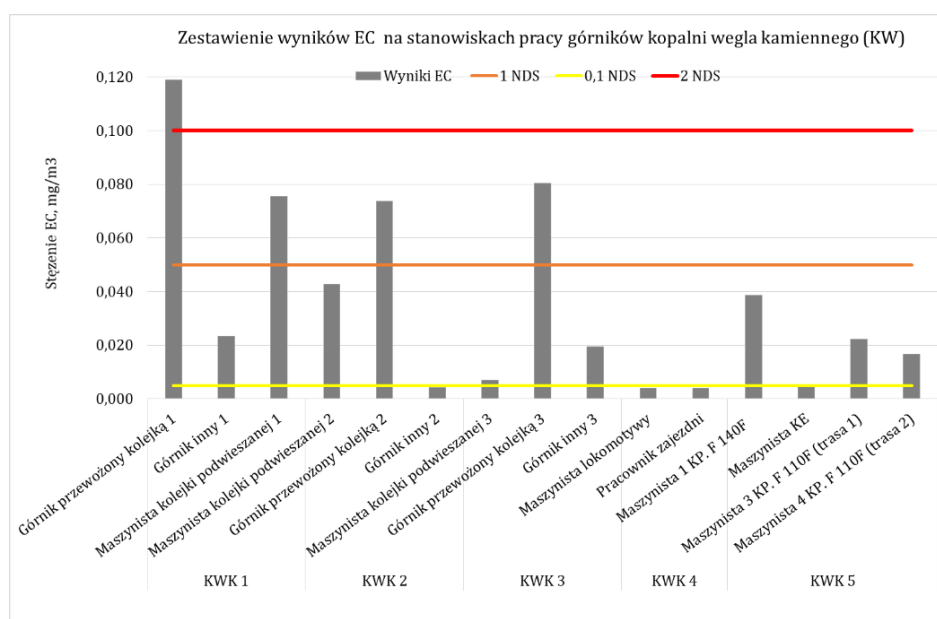
Fot. Silnik Diesla w kolejce podwieszanej (fot. własna)

**ZAKRESY STĘŻEŃ EC NA BADANYCH STANOWISKACH PRACY
W WYROBISKACH GÓRNICZYCH W KOPALNIACH WĘGLA
KAMIENNEGO (KW) I KOPALNIACH NIEWĘGLOWYCH ORAZ
PODCZAS DRAŻENIA TUNELU**

Badani pracownicy	Średnie stężenie EC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Krotność NDS NDS = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	MIN	MAX	
Maszyniści kolejki podwieszanej (wrobisko KW)	4	74	0,08–1,48
Maszynista lokomotywy torowej (wrobisko KW)	19		0,4
Górnicy przewożeni kolejką (wrobisko KW)	74	119	1,5–2,4
Inni górnicy (wrobisko KW)	4	23	0,08–0,5
Górnicy i operatorzy maszyn (kopalni niewęglowych)	5,8	50	0,12–1,0
Operatorzy multicara (drażenie tunelu)	22,4	56,1	0,4–1,1



Fot. Oprawa do próbnika DPM z cyklonem do pobierania spalin Diesla (fot. własna)

Fot. Próbnik DPM z impaktorem odcinającym frakcje < 1 μm (fot. <https://www.airmet.com.au/dies-el-particulate-matter-dpm-cassettes>)

Fot. Analizator tlenków azotu i tlenku węgla (fot. własna)

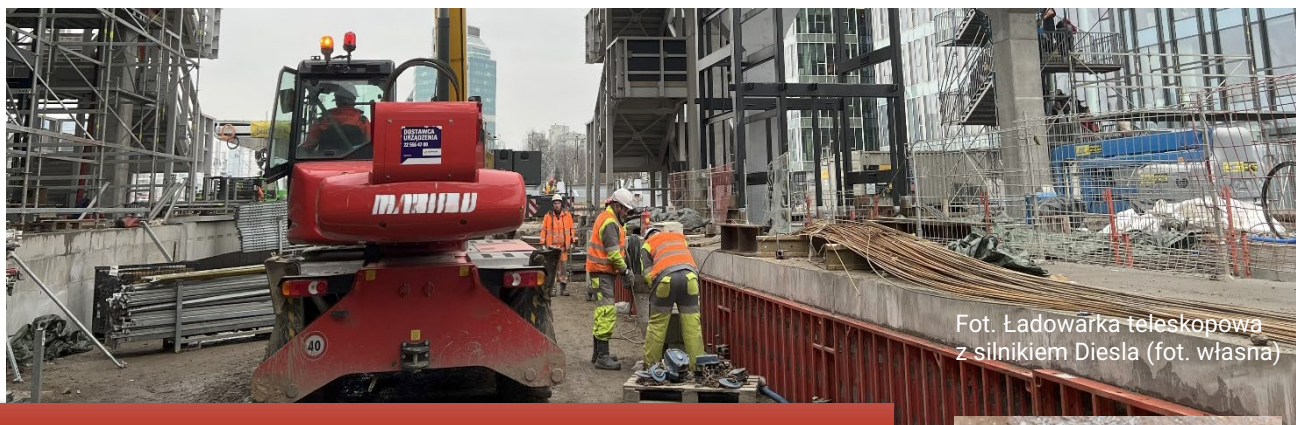


WYNIKI OZNACZANIA NO NA STANOWISKACH PRACY W KOPALNIACH NIEWĘGLOWYCH

Badani pracownicy	Zakresy górnej granicy przedziału ufności dla średnich wyników pomiarów (GG), mg/m ³ , (n=15)		Krotność NDS dla GG NDS 2,5 mg/m ³	Zakresy dolnej granicy przedziału ufności dla średnich wyników pomiarów (DG) mg/m ³ (n=15)		Krotność NDS dla DG NDS 2,5 mg/m ³
	MIN	MAX		MIN	MAX	
Kopalnia 1						
Górnik operator maszyn	2,77	5,60	1,11–2,24	0,98	1,40	0,39–0,56
Ślusarz-mechanik w komorze maszyn ciężkich	0,95	3,22	0,38–1,29	0,56	1,19	0,22–0,48
Ślusarz-mechanik na maszynie do rozbijania brył skalnych	4,80	6,62	1,92–2,65	1,26	1,65	0,50–0,66
Kopalnia 2						
Górnik operator maszyn	3,08	7,95	1,23–3,18	1,02	1,54	0,41–0,62
Ślusarz-mechanik na maszynie do rozbijania brył skalnych	2,56	6,58	1,02–2,63	0,91	1,47	0,36–0,59
Ślusarz-mechanik w komorze maszyn ciężkich	0,74	2,10	0,30–0,84	0,42	0,91	0,17–0,36
Kopalnia 3						
Górnik operator maszyn	4,87	6,76	1,95–2,70	1,44	1,79	0,58–0,72
Ślusarz-mechanik na maszynie do rozbijania brył skalnych	1,37	6,20	0,55–2,48	0,67	1,61	0,27–0,64
Ślusarz-mechanik w komorze maszyn ciężkich	1,33	5,90	0,53–2,36	0,70	1,52	0,28–0,61
Kopalnia 4						
Ślusarz-spawacz w komorze maszyn ciężkich	1,16	6,51	0,46–2,60	0,53	2,49	0,21–1,00
Górnik operator maszyn	0,88	1,19	0,35–0,48	0,35	0,42	0,14–0,17
Ślusarz-mechanik na maszynie do rozbijania brył skalnych	0,88	1,23	0,35–0,49	0,35	0,49	0,14–0,20
Ślusarz-mechanik w komorze maszyn ciężkich	0,67	1,40	0,27–0,56	0,32	0,35	0,13–0,14

Z danych (uzyskanych w stosunku do **tlenku azotu**) oraz z przeprowadzonych rozmów z osobami wykonującymi pomiary tego gazu w kopalniach niewęglowych wynika, że **liczba stanowisk, na których występują stężenia większe od NDS, maleje**, a wynika to z:

- zastosowania systemów kontroli emisji spalin na rurach wydechowych maszyn i urządzeń z silnikami Diesla,
- wprowadzania urządzeń z silnikami nowej generacji.

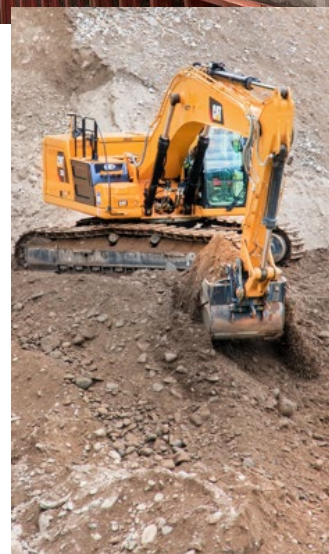


Fot. Ładowarka teleskopowa z silnikiem Diesla (fot. własna)

Czynniki wpływające na poziom stężeń spalin w środowisku pracy

W miejscach pracy, gdzie wykorzystywane są pojazdy lub urządzenia zasilane silnikami wysokoprężnymi i występuje narażenie pracowników na szkodliwe działanie emitowanych spalin Diesla, istotna jest analiza potencjalnych źródeł emisji uwzględniająca następujące aspekty:

Rodzaj i liczba silników wysokoprężnych oraz sprzętu napędzanego tymi silnikami	Im więcej takich urządzeń jest eksploatowanych, tym większe potencjalne narażenie.
Lokalizacja źródeł emisji	- Ważne jest, czy spaliny uwalniane są w przestrzeni zamkniętej czy na otwartej przestrzeni. - Większe narażenie jest w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie wentylacja jest ograniczona, a emisje mogą się kumulować. - Znaczenie ma również odległość i położenie stanowisk pracy względem źródeł emisji.
Systemy wentylacyjne i otwory komunikacyjne	Należy zwrócić uwagę, czy istnieją kratki, przewody wentylacyjne oraz drzwi i okna, przez które spaliny z zewnątrz lub innych stref mogą przedostawać się do pomieszczeń, w których przebywają pracownicy.
Stopień wentylacji pomieszczeń	Szczególne zagrożenie stanowią słabo wentylowane lub zamknięte przestrzenie, w których może dojść do wysokiego stężenia szkodliwych substancji.
Osad sadzy w pomieszczeniu	Widoczne nagromadzenie cząstek sadzy na powierzchniach może świadczyć o nadmiernym poziomie zanieczyszczenia powietrza spalinami.
Zgłaszane przez pracowników objawy zdrowotne	- Do symptomów narażenia na spaliny należą m.in. podrażnienia oczu i dróg oddechowych, bóle głowy, zawroty głowy oraz nudności. - Warto zebrać informacje bezpośrednio od pracowników oraz przeanalizować dokumentację dotyczącą nieobecności chorobowych i wypadków przy pracy.



Fot. Koparka na wyrobisku (susanne906/Pixabay)



Fot. Serwis samochodowy (fot. własna)

Kolejnym etapem oceny narażenia na SSD jest przeprowadzanie pomiarów stężeń EC i NO w powietrzu na stanowiskach pracy. Pomiary te powinny być wykonywane przez laboratoria akredytowane.



Podsumowanie

Fot. Samochód ciężarowy i koparka na wyrobisku (Pexels/Pixabay)

Zarówno węgiel elementarny, jak i tlenek azotu to substancje zanieczyszczające powietrze o udowodnionym szkodliwym wpływie na zdrowie człowieka. Kluczowe znaczenie mają działania prewencyjne – zarówno w miejscu pracy, jak i w przestrzeni publicznej – mające na celu ograniczenie ekspozycji oraz monitorowanie poziomu tych substancji.

Bibliografia

- International Agency for Research on Cancer. Diesel and gasoline engine exhaust and some nitroarenes. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; 2012; Lyon, France.
- Nordenhall C, Pourazar J, Blomberg A, et al. Eur. Respir. J. 2001;17(5):909.
- Xu Y, Barregard L, Nielsen J, et al. Part Fibre Toxicol., 2013;10:60.
- Debia M, Couture C, Njanga PE, et al. Int. J. Min. Sci. Technol. 2017;27.
- Szewczyńska M, Kowalska J, Przybyła M, et al. Przem. Chem. 2023; 102(10):1064.
- Szewczyńska M, Kowalska J, Przybyła M, et al. Przem. Chem. 2022; 101(8):591.
- NIOSH 5040, Elemental Carbon (Diesel Particulate), NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM); 2004.
- Berlinger B, Ellingsen DG, Romanova N, et al. ANN. WORK EXPO. HEALTH, 2019;63(3):349.
- HSE. Control of diesel engine exhaust emissions in the work-place; 2012.
- Hesterberg TW, Long CM, Bunn WB, et al. Inhal. Toxicol. 2012;24:1.
- Park H, Hwang E, Jang M, et al. PLoS ONE 15(9):e0239010. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239010>.
- Hedmer M, Wierzbicka A, Li H, et al. Ann Work Expo Health 2017 Jun 1;61(5):539–553. doi: 10.1093/annweh/wxx024. PMID: 28371844.

Według HSE 2012

Dym wydobywający się z rury wydechowej może świadczyć o nadmiernym narażeniu na spaliny.

Obserwacja koloru spalin może wskazywać na źródło problemu.

NIEBIESKAWY DYM

– sugeruje obecność niespalonego oleju silnikowego lub paliwa. Może to świadczyć o nieprawidłowej pracy silnika, który wymaga przeglądu lub naprawy.

CZARNY DYM

– oznacza wysoką emisję cząstek stałych oraz niespalonego paliwa i oleju. Przyczyną może być usterka mechaniczna lub intensywna praca silnika pod dużym obciążeniem.

BIAŁY DYM

– wskazuje na obecność wody lub niespalonego paliwa; pojawia się najczęściej przy zimnym silniku.