



ELŻBIETA JANKOWSKA, TOMASZ JANKOWSKI,  
WOJCIECH ZATORSKI, PIOTR SOBIECH

**Profilaktyka techniczna  
rozprzestrzeniania się nanoobjektów  
oraz ich aglomeratów i agregatów  
(NOAA) w środowisku pracy  
– zalecenia**

**Elżbieta Jankowska, Tomasz Jankowski,  
Wojciech Zatorski, Piotr Sobiech**

**Profilaktyka techniczna  
rozprzestrzeniania się  
nanoobjektów oraz ich aglomeratów  
i agregatów (NOAA) w środowisku pracy  
– zalecenia**

**CIOP  PIB**

Warszawa 2016

Opracowano i wydano w ramach III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” (2014-2016) finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy

dr inż. Elżbieta Jankowska, mgr inż. Tomasz Jankowski, mgr inż. Piotr Sobiech  
– Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
dr inż. Wojciech Zatorski

Projekt okładki

Anna Antoniszewska

Opracowanie graficzne

Anna Borkowska

Opracowanie redakcyjne

Zespół Redakcji Wydawnictw Naukowych

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
Warszawa 2016

ISBN 978-83-7373-230-8

**CIOP**  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

tel. (22) 623 36 98, fax (22) 623 36 93, 623 36 95, [www.ciop.pl](http://www.ciop.pl)

<b>1. Wprowadzenie</b> .....	5
<b>2. Profilaktyka techniczna – zapobieganie rozprzestrzenianiu się NOAA</b> .....	5
<b>3. Badanie rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu środowiska pracy</b> .....	8
3.1. Metodyka badania .....	8
3.2. Wyniki badania rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu pomieszczenia podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu .....	13
3.3. Omówienie wyników .....	26
<b>4. Zalecenia do profilaktyki technicznej</b> .....	27
4.1. Wentylacja i klimatyzacja.....	28
4.2. Filtry powietrza.....	33
<b>5. Bibliografia</b> .....	38



# 1. Wprowadzenie

Zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom zatrudnionym na stanowiskach pracy w procesach nanotechnologicznych jest zagadnieniem bardzo złożonym i trudnym do zrealizowania w praktyce bez wiedzy na temat rzeczywistego rozprzestrzeniania się nanoobjektów oraz ich aglomeratów i agregatów (NOAA) w powietrzu w pomieszczeniach pracy. Szczególnie dotyczy to stanowisk pracy usytuowanych w tych samych pomieszczeniach, w których występują źródła emisji NOAA, zlokalizowanych jednak w pewnej odległości od tych źródeł. Na tych stanowiskach zagrożenie przez NOAA może wystąpić w wyniku rozprzestrzeniania się cząstek o nanowymiarach w całym pomieszczeniu w różny sposób, w zależności od lokalizacji źródeł ich emisji oraz stosowanych środków ochrony zbiorowej. Istotny wpływ na proces rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu pomieszczeń pracy mogą mieć również parametry powietrza, takie jak temperatura, wilgotność względna i prędkość.

## 2. Profilaktyka techniczna – zapobieganie rozprzestrzenianiu się NOAA

Profilaktyka techniczna, zmierzająca do zapobiegania rozprzestrzenianiu się cząstek o nanowymiarach w powietrzu w pomieszczeniach pracy, powinna się opierać na wynikach badań parametrów charakteryzujących cząstki (takich jak: stężenie liczbowe, stężenie powierzchniowe, średni wymiar cząstek, rozkład wymiarów cząstek, kształt i skład chemiczny cząstek), wykonywanych w rzeczywistych warunkach w odniesieniu do trzech (występujących pojedynczo lub łącznie) źródeł emisji NOAA. Na podstawie definicji UE [2] źródłami są:

- ♦ **procesy ze specjalnie wytworzonymi nanomateriałami**, tzn. wytworzonymi różnymi metodami, z zastosowaniem techniki *bottom-up* (nanomateriały są budowane z atomów, molekuł itd.) i *top-down* (nanomateriały

są uzyskiwane w wyniku rozdrabniania materiałów o większych wymiarach z użyciem różnych metod i urządzeń), oraz stosowanie nanomateriałów w różnych procesach pracy

- ♦ **źródła przypadkowe**, tzn. te, z których są emitowane cząstki o nanowymiarach, często nazywane cząstkami ultra drobnymi, np. w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej, podczas spalania oleju napędowego w silnikach Diesla, w wyniku wzrostu temperatury w danym miejscu w pomieszczeniu pracy, podczas używania rurek zadymiających (Dräger) stosowanych w badaniach wentylacji do wizualizacji przepływu powietrza w pomieszczeniu
- ♦ **źródła naturalne**, tzn. napływ NOAA do badanego pomieszczenia z powietrzem atmosferycznym, o stężeniu i wymiarach cząstek mogących znacznie się różnić nawet w ciągu jednego dnia, również w przypadku zdarzeń występujących w znacznej odległości od badanego pomieszczenia pracy, np. w wyniku wybuchu wulkanu.

Podczas pomiaru parametrów cząstek o nanowymiarach („tła”, u źródła ich emisji, w wyniku rozprzestrzeniania się i podczas utrzymywania się cząstek w powietrzu) w tych samych punktach pomiarowych powinny być mierzone parametry powietrza.

Przed rozpoczęciem pomiarów parametrów cząstek i parametrów powietrza powinny być wykonywane pomiary prędkości powietrza w przewodach wentylacyjnych lub na kratkach wentylacyjnych i określone strumienie objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego z badanego pomieszczenia, w celu zbilansowania strumieni i określenia rodzaju panującej w pomieszczeniu wentylacji. Dla danego stanu w pomieszczeniu może występować:

- ♦ **wentylacja podciśnieniowa**, gdy strumień objętości powietrza nawiewanego jest mniejszy od strumienia objętości powietrza wywiewanego
- ♦ **wentylacja zrównoważona**, gdy strumienie objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego są do siebie zbliżone
- ♦ **wentylacja nadciśnieniowa**, gdy strumień objętości powietrza nawiewanego jest większy od strumienia objętości powietrza wywiewanego.

Analiza uzyskanych wyników badań powinna być podstawą do modyfikowania istniejących lub zainstalowania innych środków ochrony zbiorowej (wentylacji ogólnej i miejscowej wyposażonej w odpowiednie filtry powietrza), aby

najskuteczniej wychwytywać NOAA u źródła ich emisji i w jak największym stopniu zapobiegać ich rozprzestrzenianiu się w powietrzu pomieszczenia. Jest to możliwe dzięki zainstalowaniu właściwie współdziałającej wentylacji mechanicznej ogólnej i miejscowej. Nieodpowiednio działająca wentylacja mechaniczna ogólna może spowodować niewłaściwy rozdział powietrza w pomieszczeniu, co może prowadzić do powstawania obszarów niewentylowanych i w konsekwencji do gromadzenia się NOAA o znacznych stężeniach w różnych obszarach pomieszczenia. Brak wentylacji lub stosowanie nieefektywnej wentylacji miejscowej (np. dygestorium) w pobliżu źródła NOAA może skutkować ich rozprzestrzenieniem się w powietrzu pomieszczenia. Wszędzie, gdzie to jest możliwe, należy rozważyć zastosowanie wentylacji miejscowej w pełni zabezpieczającej przed emisją NOAA, np. komory rękawicowej (ang. *glove box*).

W kolejnych rozdziałach podano metody pomiarowe stosowane do określania parametrów charakteryzujących NOAA i powietrze oraz systemy wentylacji funkcjonujące w badanym pomieszczeniu. Stosując taką samą metodykę, przeprowadzono badania rozprzestrzeniania się NOAA podczas mieszania trzech rodzajów nanomateriałów, a mianowicie: nanocząstek ditlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ), nanopłytek glinokrzemianu warstwowego – *nanoclay bentonite* oraz nanorurek węglowych – *multi-wall nanotubes MWCNTs 30-50*. Jako przykładowe przedstawiono wyniki badań rozprzestrzeniania się NOAA podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ). Następnie omówiono środki ochrony zbiorowej (systemy wentylacji wyposażone w odpowiednie filtry powietrza), których właściwy dobór i stosowanie może zapewnić bezpieczne warunki pracy w pomieszczeniach ze źródłami emisji NOAA, przez zapobieganie ich rozprzestrzenianiu się w powietrzu tych pomieszczeń.



## 3. Badanie rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu środowiska pracy

### 3.1. Metodyka badania

Przedstawioną dalej metodykę stosowaną do badania rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu w pomieszczeniach, w których występowały źródła emisji NOAA, opracowano w CIOP-PIB\*.

Metodyka obejmuje badanie parametrów charakteryzujących:

- ♦ NOAA – takich jak: stężenie liczbowe, stężenie powierzchniowe, średnie wymiary cząstek, rozkłady wymiarów cząstek, ich kształt i skład chemiczny
- ♦ powietrze – takich jak: temperatura, wilgotność względna i prędkość
- ♦ środki ochrony zbiorowej stosowane w pomieszczeniach (systemy wentylacji ogólnej i miejscowej) – takich jak: strumienie objętości powietrza nawiewanego do pomieszczenia i z niego wywiewanego.

Parametry charakteryzujące emisję NOAA określano z użyciem stosowanych dotychczas, głównie w laboratoriach, przyrządów pomiarowych o dużych wymiarach, takich jak: system analizy wymiarowej cząstek (tab. 1), licznik kondensacyjny cząstek P-Trak (tab. 2) i miernik aerozolu nanocząstek Aero-Trak (tab. 3) oraz sześciu przenośnych mierników DiscMini (tab. 4). W celu określenia kształtu i składu chemicznego NOAA obecnych w powietrzu próbki powietrza pobierano z zastosowaniem próbnika nanoaerozolu NAS (tab. 5).

Badania przeprowadzano w następujący sposób. W pobliżu źródła emisji cząstek zastosowano jeden z sześciu przenośnych przyrządów DiscMini (pomiar stężeń cząstek z zakresu 10 – 700 nm i średnich wymiarów cząstek z zakresu 10 – 300 nm). Określano również stężenie liczbowe cząstek z zakresu 20 – 1000 nm z użyciem P-Trak oraz stężenie liczbowe i rozkład wymiarów cząstek z zakresu 15 – 615 nm z zastosowaniem systemu SMPS, a także

---

\* Projekt II.P02/TSB: Badanie procesu rozprzestrzeniania się nanoobjektów w powietrzu pomieszczeń pracy.

stężenie powierzchniowe cząstek z zakresu 10 – 1000 nm z użyciem Aero-Trak. W pobliżu źródeł emisji cząstek pobierano próbki powietrza za pomocą próbnika aerozolu NAS, do ich dalszej analizy z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Ultra High Resolution FE-SEM z systemem EDS-Bruker Quantacs 400 (badania mikroskopowe wykonano w Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny, Instytutu Wysokich Ciśnień PAN).

W innych pięciu punktach pomiary wykonywano z użyciem jednocześnie kolejnych pięciu mierników DiscMini umieszczonych w miejscach istotnych ze względu na możliwość rozprzestrzeniania się cząstek o nanowymiarach w powietrzu pomieszczenia.

Tabela 1. Informacje dotyczące systemu SMPS do pomiaru stężenia liczbowego i rozkładu wymiarów cząstek

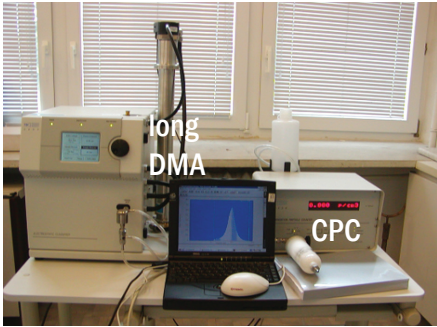
<b>System analizy wymiarów cząstek – SMPS (ang. <i>scanning mobility particle sizer spectrometer</i>) zawierający licznik kondensacyjny CPC, TSI model 3022A oraz analizator ruchliwości elektrycznej cząstek DMA – model 3080L</b>	
<b>Mierzone parametry</b>	<b>Opis przyrządu pomiarowego</b>
<p>Stężenie liczbowe i rozkład wymiarów cząstek z zakresu 15 – 615 nm</p> 	<p>Kondensacyjny licznik CPC umożliwia pomiar stężenia liczbowego cząstek do <math>10^7</math> cząstek/cm<sup>3</sup>. Dokładność zliczania, w zależności od stężenia cząstek, wynosi: <math>\pm 10\%</math> dla stężeń do <math>5 \cdot 10^5</math> cząstek/cm<sup>3</sup> i <math>\pm 20\%</math> dla stężeń od <math>5 \cdot 10^5</math> do <math>10^7</math> cząstek/cm<sup>3</sup>.</p> <p>Dla stężeń poniżej 10 000 cząstek/cm<sup>3</sup> zliczanie jest przeprowadzane w trybie zliczania pojedynczego (zliczane są pojedyncze cząstki), natomiast przy większych stężeniach, aż do <math>10^7</math> cząstek/cm<sup>3</sup>, zliczanie jest przeprowadzane w trybie fotometrycznym.</p> <p>W analizatorze ruchliwości elektrycznej cząstek (DMA) cząstki są klasyfikowane według ich elektrycznej ruchliwości. Ruchliwość elektryczna cząstki jest funkcją jej wymiaru i liczby ładunków elektrycznych na niej zdeponowanych. Analizator ruchliwości elektrycznej cząstek long DMA umożliwia ich klasyfikację w zakresie 10 – 800 nm.</p>

Tabela 2. Informacje dotyczące licznika P-Trak do pomiaru stężenia liczbowego cząstek


<b>Licznik cząstek ultradrobnych (ang. <i>ultrafine particle counter</i>) P-Trak model 8525, TSI</b>	
<b>Mierzone parametry</b>	<b>Opis przyrządu pomiarowego</b>
<p>Stężenie liczbowe cząstek z zakresu 20 – 1000 nm</p> 	<p>P-Trak jest przyrządem umożliwiającym określenie stężenia liczbowego do <math>5 \cdot 10^5</math> cząstek/cm<sup>3</sup>. Zasada działania 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 są wykrywane przez fotodetektor i zliczane w celu określenia stężenia cząstek. Strumień objętości badanej próbki powietrza wynosi 100 cm<sup>3</sup>/min. Przed przystąpieniem do pomiarów w liczniku montuje się kasetę z knotem nasączonym alkoholem izopropylowym (co umożliwia powiększanie wymiarów mierzonych cząstek) oraz układ wlotowy, w którym umieszcza się filtr wlotowy zapobiegający przedostawaniu się do układu pomiarowego większych cząstek.</p>

Tabela 3. Informacje dotyczące miernika Aero-Trak do pomiaru stężenia powierzchniowego cząstek


<b>Miernik aerozolu nanocząstek (ang. <i>nanoparticle aerosol monitor</i>) Aero-Trak 9000, TSI</b>	
<b>Mierzone parametry</b>	<b>Opis przyrządu pomiarowego</b>
<p>Stężenie powierzchniowe cząstek z zakresu 10 – 1000 nm</p> 	<p>Aero-Trak jest przyrządem umożliwiającym określenie stężenia powierzchniowego cząstek w odniesieniu do ich dwóch frakcji wymiarów istotnych ze względu na możliwe niekorzystne dla organizmu człowieka skutki zdrowotne, tzn. frakcji torakalnej, wnikającej głębiej poprzez krtań, lecz niedostającej się aż do bezręskowych dróg oddechowych, (TB – ang. <i>tracheobronchial</i>), i frakcji respirabilnej, przenikającej do pęcherzyków płucnych (A – ang. <i>alveolar</i>). Przyrząd umożliwia pomiar stężenia powierzchniowego cząstek odpowiednio frakcji TB do 2500 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, natomiast frakcji A do 10000 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>. Dokładność pomiaru obydwu frakcji w odniesieniu do cząstek z zakresu 20 – 200 nm wynosi ± 20%. Próbkę są zasysane do miernika poprzez cyklon, który umożliwia oddzielenie frakcji o wymiarach większych od 1 μm.</p>

Tabela 4. Informacje dotyczące miernika DiscMini do pomiaru stężenia liczbowego i średniego wymiaru cząstek






<b>Miernik DiscMini</b> <b>(ang. <i>miniature diffusion size classifier</i>), Matter Aerosol</b>	
<b>Mierzone parametry</b>	<b>Opis przyrządu pomiarowego</b>
<p>Stężenie liczbowe cząstek z zakresu 10 – 700 nm oraz średni wymiar cząstek z zakresu 10 – 300 nm</p> 	<p>DiscMini jest przenośnym przyrządem (waga 700 g) umożliwiającym określenie stężenia liczbowego cząstek 10 – 700 nm w zakresie <math>10^3 - 10^6</math> cząstek/cm<sup>3</sup> oraz średniego wymiaru cząstek z zakresu 10 – 300 nm.</p>
<p>Stężenie liczbowe cząstek może być przeliczane na stężenie powierzchniowe cząstek</p>	<p>Zasada działania przyrządu jest oparta na wykorzystaniu elektryzowania aerozoli. Dodatnie jony wytwarzane w wyładowaniach koronowych są mieszane z aerozolem. Naładowane cząstki są następnie wykrywane w dwóch etapach przez elektrometry. W pierwszym etapie funkcję detektora pełnią siatki stalowe, na których małe cząstki są deponowane w wyniku dyfuzji. W drugim etapie filtr cząstek stałych o dużej wydajności wychwytuje pozostałe cząstki. Średni wymiar cząstek można uzyskać przez analizę prądów mierzonych na dwóch etapach. Stężenie liczbowe cząstek jest określane na podstawie prądu całkowitego.</p> <p>Dokładność pomiaru zależy od kształtu, rozkładu, wielkości cząstek i stężenia liczbowego; zwykle wynosi ok. 10 – 15%.</p>

Tabela 5. Informacje dotyczące próbnika nanoaerozolu NAS

<b>Próbnik aerozolu o wymiarach nanometrowych (ang. <i>nanometer aerosol sampler</i>) – NAS model 3089, TSI</b>	
<b>Mierzone parametry</b>	<b>Opis przyrządu pomiarowego</b>
<p>Pobieranie próbek aerozolu w nanoskali do jego dalszej analizy z zastosowaniem mikroskopu elektronowego SEM z detektorem EDS</p> 	<p>W celu pobrania próbki w komorze próbnika jest montowana "płytkę z taśmą miedzianą" do zbierania cząstek, w tym NOAA, podczas przepływu przez próbnik aerozolu zasysanego z użyciem pompy, w którą jest wyposażony NAS.</p> <p>Próbki aerozolu są zasysane do NAS ze strumieniem objętości umożliwiającym zapewnienie jak największej skuteczności osadzania się cząstek na "płytkę z taśmą miedzianą". Osadzanie cząstek na "płytkę z taśmą miedzianą" następuje w wyniku ich naładowania dzięki zainstalowanej w próbniku elektrodzie o stałym napięciu ładowania.</p>

Ponieważ podczas badania emisji cząstek istotne są parametry powietrza, w którym te cząstki są zawieszane lub unoszone, określano je w miejscach badań parametrów cząstek z użyciem sześciu mierników DiscMini. Mierzono temperaturę powietrza, jego wilgotność względną i prędkość za pomocą mierników przedstawionych w tabeli 6.

Tabela 6. Informacje dotyczące przyrządów stosowanych do pomiaru parametrów powietrza w sześciu punktach pomiarowych, w których były umiejscowione przyrządy DiscMini

<b>Przyrządy pomiarowe</b>	<b>Mierzone parametry</b>
<p>Wielofunkcyjne przyrządy pomiarowe, TESTO model 435-4, TESTO model 435-2, Testo AG</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– temperatura powietrza</li> <li>– wilgotność względna powietrza</li> <li>– prędkość powietrza</li> </ul>
<p>VelociCalc model 8346, model 8386-M-GB, model 8360-M-GB, model 8357, TSI</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– temperatura powietrza</li> <li>– wilgotność względna powietrza</li> </ul>
<p>Termohigrobarometry LB-701 LB-706, LAB-EL</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– temperatura powietrza</li> <li>– wilgotność względna powietrza</li> </ul>

Strumienie objętości powietrza przepływającego w przewodach wentylacji miejscowej (dygestorium) określano w wyniku pomiaru prędkości powietrza, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12599:2013 [22]. Pomiary prędkości powietrza na kratce wentylacji ogólnej wykonywano z zastosowaniem anemometru wiatraczkowego. Bilansowane strumienie objętości powietrza nawiewanego do pomieszczenia i z niego wywiewanego służyły do określenia rodzaju występującej wentylacji (podciśnieniowa lub zrównoważona) i liczby wymian powietrza w pomieszczeniu. Do pomiaru prędkości powietrza w przewodach wentylacyjnych stosowano przyrządy pomiarowe przedstawione w tabeli 6, a do pomiaru prędkości w otworach wentylacyjnych – wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy, TESTO model 435-4, Testo AG z sondą wiatraczkową o średnicy 100 mm (rys. 1).

a)



b)



Rys. 1. Wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy TESTO model 435-4, Testo AG (a) z sondą wiatraczkową o średnicy 100 mm (b), (fot. CIOP-PIB)

### 3.2. Wyniki badania rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu pomieszczenia pracy podczas mieszania nanoproczków ditlenku krzemu

Stosując metodykę przedstawioną w rozdziale 3.1, przeprowadzono badania rozprzestrzeniania się NOAA podczas mieszania trzech rodzajów nanomateriałów:

- ♦ nanocząstek ditlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ )
- ♦ nanopłytek glinokrzemianu warstwowego (*nanoclay bentonite*)
- ♦ nanorurek węglowych (*multi-wall nanotubes MWCNTs 30-50*).

Dalej przedstawiono przykładowe wyniki badań nad rozprzestrzenianiem się cząstek o nanowymiarach w powietrzu pomieszczenia pracy w trakcie emisji NOAA podczas procesu mieszania nanoproszków ditlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ) wewnątrz dygestorium. Informacje dotyczące rodzaju źródła emisji NOAA, rodzaju prowadzonych procesów z nanomateriałem oraz sytuacji dotyczącej stanu wentylacji w badanym pomieszczeniu podano w tabeli 7.

Tabela 7. Informacje dotyczące rodzaju źródła emisji nanoobjektów, rodzaju prowadzonych procesów z nanomateriałami oraz stanu wentylacji w badanym pomieszczeniu

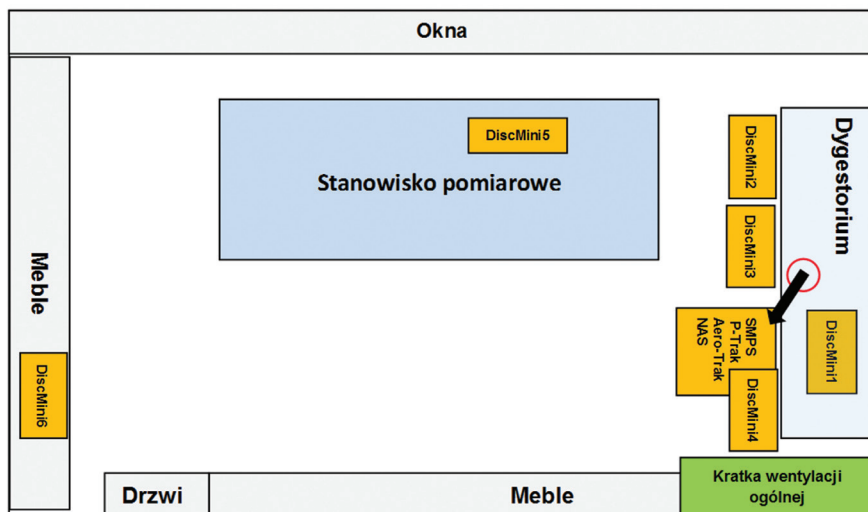
Rodzaj źródła emisji nano-objektów	Rodzaj procesu	Opis sytuacji
Procesy z nanomateriałem	mieszanie przez 30 s każdej z czterech próbek nanoproszków ditlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ) wiertarką o obrotach 2000/min, każda z próbek o masie 5 g	<p><b>sytuacja 1 i 2:</b> wentylacja ogólna wyłączona (przepustnica otwarta), okna i drzwi zamknięte, dygestorium wyłączone; mieszanie dwóch próbek (10:50 i 11:49)</p> <p><b>sytuacja 3 i 4:</b> wentylacja ogólna wyłączona (przepustnica otwarta), okna i drzwi zamknięte, dygestorium włączone; mieszanie dwóch próbek (13:50 i 14:32)</p>

W celu określenia wpływu wentylacji na rozprzestrzenianie się NOAA w powietrzu pomieszczenia wykonano badania strumieni objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego w dwóch opcjach, tzn.: kiedy dygestorium było wyłączone lub kiedy było włączone (patrz tab. 8). Wartości określonych strumieni objętości powietrza, obliczonych krotności wymian powietrza oraz informacje o rodzaju występującej w pomieszczeniu wentylacji przedstawiono w tabeli 8.

Następnie określano stężenia liczbowe, stężenia powierzchniowe oraz rozkłady wymiarów i średnie wymiary cząstek, a także parametry powietrza (temperaturę, wilgotność względną i prędkość). Sposób umiejscowienia przyrządów pomiarowych stosowanych podczas badań przedstawiono na rysunku 2.

Tabela 8. Strumienie objętości powietrza nawiewanego do pomieszczenia i z niego wywiewanego oraz rodzaj wentylacji w pomieszczeniu – wentylacja mechaniczna ogólna wyłączona (przepustnica otwarta), drzwi i okna zamknięte

Przepływ powietrza	Strumień objętości powietrza, m <sup>3</sup> /h	Liczba wymian powietrza, h <sup>-1</sup>	Rodzaj wentylacji
Dygestorium wyłączone			zrównoważona
Nawiew (przez dygestorium)	152	1,10	
Wywiew (przez kratkę wentylacji ogólnej)	141	1,02	
Dygestorium włączone			podciśnieniowa
Nawiew (przez kratkę wentylacji ogólnej)	342	2,48	
Wywiew (przez dygestorium)	958	6,95	



Rys. 2. Umieszczenie punktów pomiarowych w pomieszczeniu podczas badania rozprzestrzeniania się cząstek emitowanych w wyniku mieszania nanoproszków ditlenku krzemu; czerwone kółko – miejsce mieszania nanoproszków



Badania parametrów fizycznych cząstek o nanowymiarach wykonano przed procesami mieszania nanoproszków ditlenku krzemu, podczas ich trwania, pomiędzy nimi i po czterech procesach: z wyłączonym dygestorium – sytuacje 1, 2 i z włączonym dygestorium – sytuacje 3 i 4.

Wyniki badań rozprzestrzeniania się nanoobjektów uzyskane w sześciu punktach pomiarowych z zastosowaniem przyrządów DiscMini zobrazowano odpowiednio na rysunkach: 3 (stężenia liczbowe cząstek z zakresu 10 – 700 nm), 4 (stężenia powierzchniowe cząstek z zakresu 10 – 700 nm) i 5 (średnie wymiary cząstek z zakresu 10 – 300 nm). Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono odpowiednio porównania stężeń określonych z zastosowaniem przyrządów laboratoryjnych (SMPS/P-Trak lub Aero-Trak) i przenośnego przyrządu DiscMini1, a więc danych określonych w powietrzu wewnątrz dygestorium w pobliżu miejsca, w którym mieszano nanoproszki (w odległości ok. 20 cm). Porównanie takie miało na celu stwierdzenie, czy istnieją korelacje pomiędzy danymi uzyskiwanymi z zastosowaniem przyrządów laboratoryjnych (SMPS/P-Trak lub Aero-Trak) i przyrządu przenośnego (DiscMini1).

Zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w publikacji [1] jako wskaźniki wpływu procesów mieszania na wzrost stężenia liczbowego/powierzchniowego cząstek w odniesieniu do stężenia „tła”,  $W_{L/P,zm}$ , przyjęto stosunki wartości maksymalnych stężeń  $C_{L/P,max}$  uzyskanych w wyniku procesu mieszania do wartości określonych bezpośrednio przed procesem,  $C_{L/P,tlo}$ , gdy dygestorium było wyłączone i włączone:

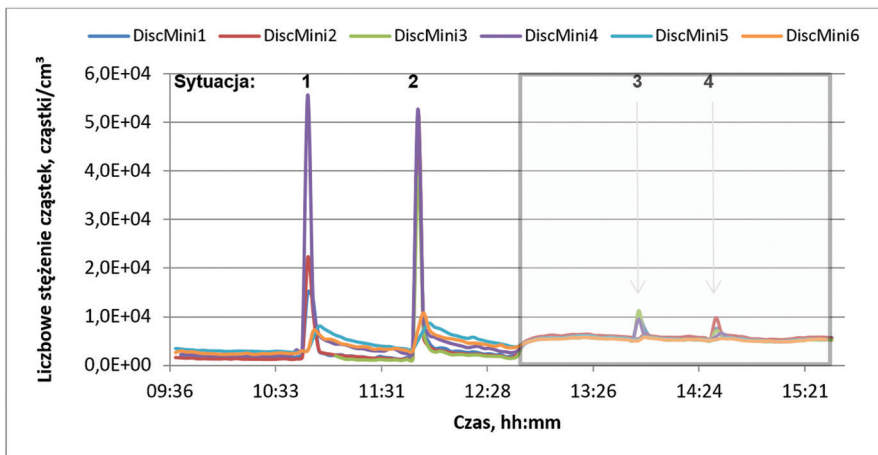
$$W_{L/P,zm} = \frac{C_{L/P,max}}{C_{L/P,tlo}} \quad (1)$$

Trendy zmian średnich wymiarów cząstek w wyniku realizacji procesu mieszania  $SiO_2$  są odwrotne do tych, jakie zaobserwowano w przypadku zmian stężeń liczbowych i powierzchniowych – średnie wymiary cząstek ulegają bowiem zmniejszeniu. Wskaźniki zmienności średnich wymiarów cząstek,  $W_{W,zm}$ , określające wpływ procesów na zmniejszenie się tych wymiarów w odniesieniu do średnich wymiarów cząstek „tła”, przyjęto jako stosunki wartości średnich wymiarów cząstek określonych bezpośrednio przed procesami,  $C_{W,tlo}$ , do minimalnych wartości średnich wymiarów cząstek uzyskanych w wyniku procesów,  $C_{W,min}$ , gdy dygestorium było wyłączone/włączone:

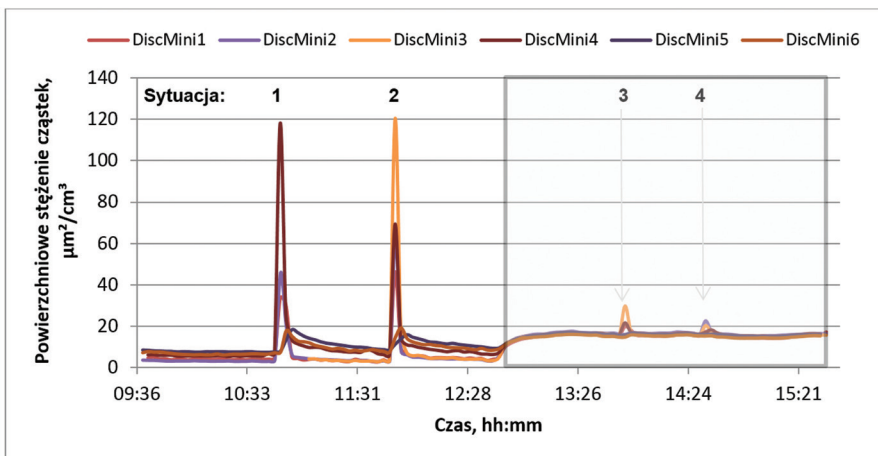
$$W_{W,zm} = \frac{C_{W,tlo}}{C_{W,min}} \quad (2)$$

Rezultaty obliczeń wskaźników zmienności stężeń liczbowych,  $W_{L,zm}$ , stężeń powierzchniowych,  $W_{P,zm}$ , i średnich wymiarów cząstek,  $W_{W,zm}$ , w wyniku prowadzenia procesów mieszania nanoproszków, przy wyłączonym/włączonym dygestorium, przedstawiono odpowiednio w tabelach: 9 (stężeń liczbowych), 10 (stężeń powierzchniowych) i 11 (średnich wymiarów cząstek). Do obliczeń wskaźników zmienności przyjęto średnie wartości stężeń i wymiarów cząstek uzyskane podczas dwóch procesów mieszania danego nanoproszku przy włączonym/wyłączonym dygestorium.

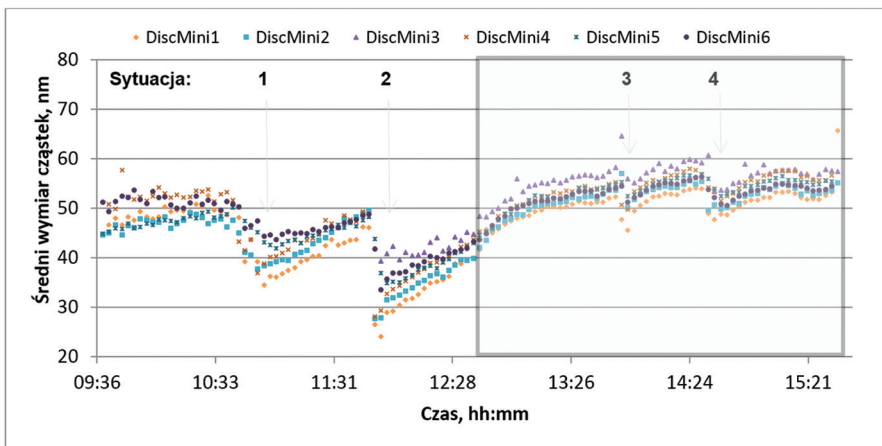
Rozkłady wymiarów cząstek określone dla cząstek „tła” bezpośrednio przed procesami mieszania ditlenku krzemu oraz dla maksymalnych wartościach stężeń liczbowych w wyniku procesu mieszania przedstawiono odpowiednio na rysunkach: 8 – dla wyłączonego dygestorium (sytuacje 1 i 2) i 9 – dla włączonego dygestorium (sytuacje 3 i 4). Na rysunkach 10-12 przedstawiono odpowiednio wyniki pomiarów temperatury, wilgotności względnej i prędkości powietrza określone w sześciu punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne mierniki DiscMini. Na rysunkach 13-15 zamieszczono zdjęcia mikroskopowe i skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza w pobliżu miejsca prowadzenia procesu mieszania nanoproszków ditlenku krzemu odpowiednio przed procesami mieszania – „tło” (rys. 13), w ich trakcie, kiedy dygestorium było wyłączone (rys. 14), oraz podczas procesów mieszania, kiedy dygestorium było włączone (rys. 15).



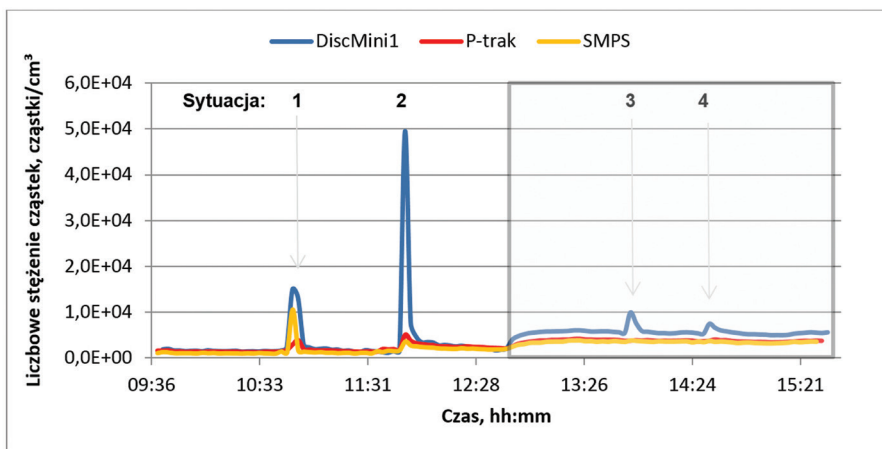
Rys. 3. Wyniki pomiaru liczbowych stężeń cząstek z zakresu 10 – 700 nm (DiscMini) w sześciu punktach pomiarowych w pomieszczeniu – przy wyłączonej wentylacji mechanicznej ogólnej podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu: sytuacje 1 i 2 – dwa procesy mieszania, wyłączone dygestorium; sytuacje 3 i 4 – dwa procesy mieszania, włączone dygestorium (szary prostokąt)



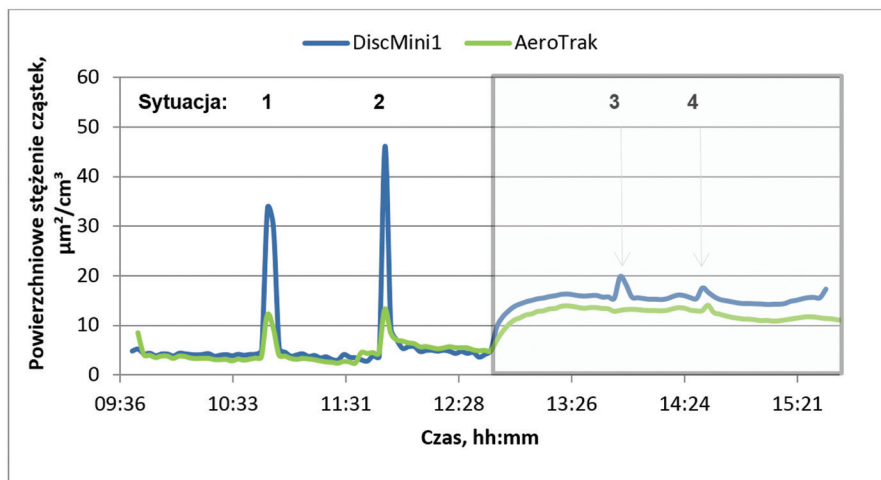
Rys. 4. Wyniki pomiaru stężeń powierzchniowych cząstek z zakresu 10 – 700 nm (DiscMini) w sześciu punktach pomiarowych w pomieszczeniu – przy wyłączonej wentylacji mechanicznej ogólnej podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu: sytuacje 1 i 2 – dwa procesy mieszania, wyłączone dygestorium; sytuacje 3 i 4 – dwa procesy mieszania, włączone dygestorium (szary prostokąt)



Rys. 5. Wyniki pomiaru średniego wymiaru cząstek z zakresu 10 – 300 nm (DiscMini) w sześciu punktach pomiarowych w pomieszczeniu – przy wyłączonej wentylacji mechanicznej ogólnej podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu: sytuacje 1 i 2 – dwa procesy mieszania, wyłączone dygestorium; sytuacje 3 i 4 – dwa procesy mieszania, włączone dygestorium (szary prostokąt)



Rys. 6. Wyniki pomiarów stężenia liczbowego cząstek z użyciem DiscMini1 (10 – 700 nm), P-Trak (20 – 1000 nm) i SMPS (15 – 615 nm) podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu; wyłączone dygestorium (sytuacje 1 i 2) i włączone dygestorium (sytuacje 3 i 4) – szary prostokąt



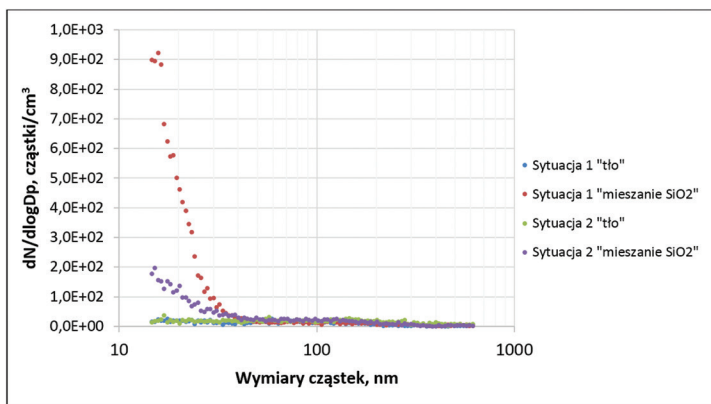
Rys. 7. Wyniki pomiarów stężenia powierzchniowego cząstek określonych z użyciem DiscMini1 (10 – 700 nm) i Aero-Trak (10 – 1000 nm) podczas mieszania nanoproszków  $\text{SiO}_2$ ; wyłączone dygestorium (sytuacje 1 i 2) i włączone dygestorium (sytuacje 3 i 4) – szary prostokąt

Tabela 9. Wyniki obliczeń wskaźników zmienności stężeń liczbowych cząstek,  $W_{L,zm}$ , podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu przy wyłączonym (sytuacje 1 i 2) i włączonym (sytuacje 3 i 4) dygestorium

Przyrząd pomiarowy	Mieszanie $\text{SiO}_2$ (maksymalne stężenia liczbowe, cząstki/ $\text{cm}^3$ )		„Tło” cząstek (stężenie liczbowe przed mieszaniem $\text{SiO}_2$ , cząstki/ $\text{cm}^3$ )		Wskaźniki zmienności (maksymalne liczbowe stężenie do stężenia cząstek „tła”)	
	$W_{L,zm,wy}$ $W_{L,zm,wł}$					
	Dygestorium					
	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone
P-Trak (20 – 1000 nm)	4523	3992	1359	3708	3,33	1,08
DiscMini1 (10 – 700 nm)	32292	8767	1557	5502	20,75	1,59
DiscMini2 (10 – 700 nm)	37123	8132	1535	5507	24,18	1,48
DiscMini3 (10 – 700 nm)	38884	9185	1114	5088	34,90	1,81
DiscMini4 (10 – 700 nm)	54164	8015	2070	5255	26,17	1,53
DiscMini5 (10 – 700 nm)	8411	5823	2990	5376	2,81	1,08
DiscMini6 (10 – 700 nm)	9030	5692	2742	5145	3,29	1,11

Tabela 10. Wyniki obliczeń wskaźników zmienności stężeń powierzchniowych cząstek,  $W_{p,zm}$ , podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu przy wyłączonym (sytuacje 1 i 2) i włączonym (sytuacje 3 i 4) dygestorium

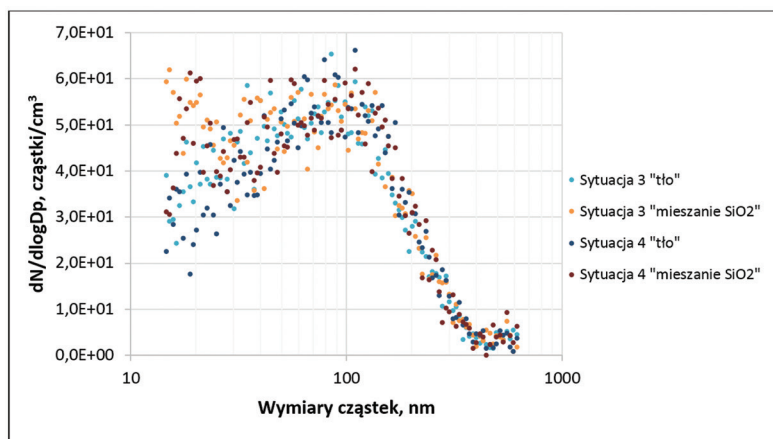
Przyrząd pomiarowy	Mieszanie $SiO_2$ (maksymalne stężenia powierzchniowe cząstek $\mu m^2/cm^3$ )		„Tło” cząstek (stężenie powierzchniowe przed mieszaniem $SiO_2$ , $\mu m^2/cm^3$ )		Wskaźniki zmienności (maksymalne powierzchniowe stężenie do stężenia cząstek „tła”)			
							$W_{p,zm,wy}$	$W_{p,zm,wł}$
	Dygestorium							
	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone		
Aero-Trak (10 – 1000 nm)	13	14	3	13	5,00	1,04		
DiscMini1 (10 – 700 nm)	40	19	4	15	10,00	1,27		
DiscMini2 (10 – 700 nm)	55	20	4	16	15,57	1,25		
DiscMini3 (10 – 700 nm)	120	25	3	16	40,00	1,56		
DiscMini4 (10 – 700 nm)	94	20	6	16	15,58	1,25		
DiscMini5 (10 – 700 nm)	18	17	8	16	2,33	1,03		
DiscMini6 (10 – 700 nm)	19	16	8	15	2,47	1,03		



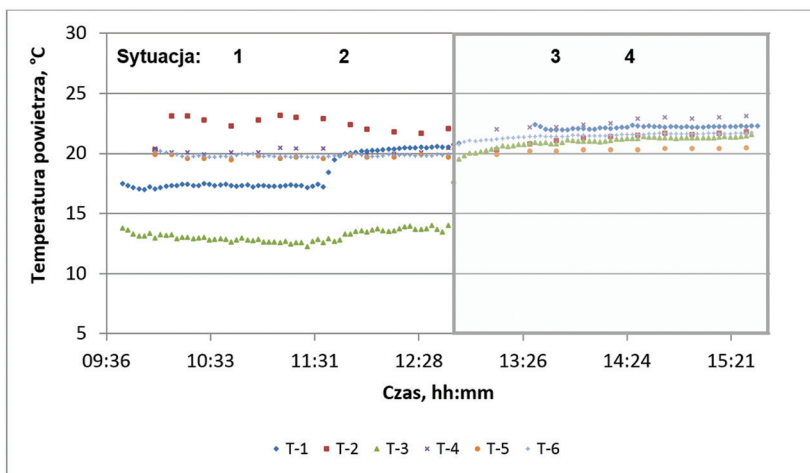
Rys. 8. Rozkłady wymiarów cząstek (SMPS) określone dla cząstek „tła” bezpośrednio przed procesami mieszania ditlenku krzemu oraz dla maksymalnych wartości stężeń liczbowych w wyniku procesów mieszania; wyłączony dygestorium (sytuacje 1 i 2)

Tabela 11. Wyniki obliczeń wskaźników zmienności średnich wymiarów cząstek,  $W_{W,zm}$ , podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu przy wyłączonym (sytuacje 1 i 2) i włączonym (sytuacje 3 i 4) dygestorium

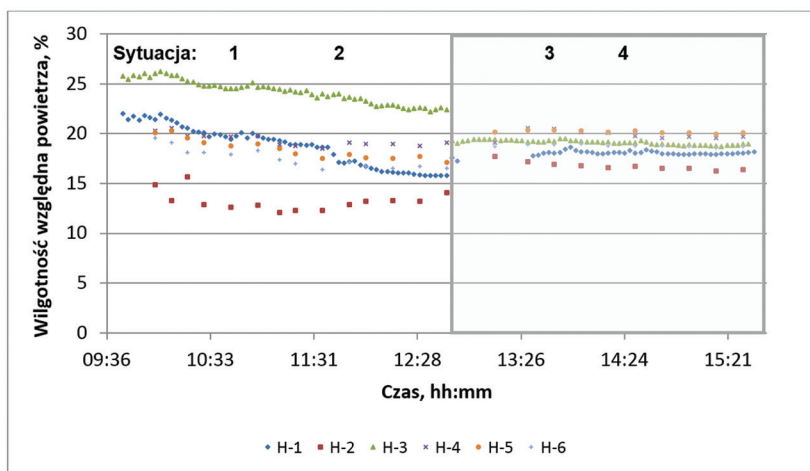
Przyrząd pomiarowy	Mieszanie SiO <sub>2</sub> (minimalne średnie wymiary cząstek, nm)		„Tło” cząstek (średnie wymiary cząstek przed mieszaniem SiO <sub>2</sub> , nm)		Wskaźniki zmienności (średni wymiar cząstek „tła” do minimalnego wymiaru cząstek)	
	$W_{W,zm,wy}$ $W_{W,zm,wł}$					
	Dygestorium					
	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone
DiscMini1 (10 – 700 nm)	29	47	48	53	1,64	1,13
DiscMini2 (10 – 700 nm)	33	50	49	52	1,48	1,04
DiscMini3 (10 – 700 nm)	39	55	55	63	1,41	1,15
DiscMini4 (10 – 700 nm)	33	51	51	57	1,57	1,11
DiscMini5 (10 – 700 nm)	39	53	49	56	1,27	1,07
DiscMini6 (10 – 700 nm)	39	51	50	55	1,28	1,08



Rys. 9. Rozkłady wymiarów cząstek (SMPS) określone dla cząstek „tła” bezpośrednio przed procesami mieszania ditlenku krzemu oraz dla maksymalnych wartości stężeń liczbowych w wyniku procesów mieszania; włączone dygestorium (sytuacje 3 i 4)

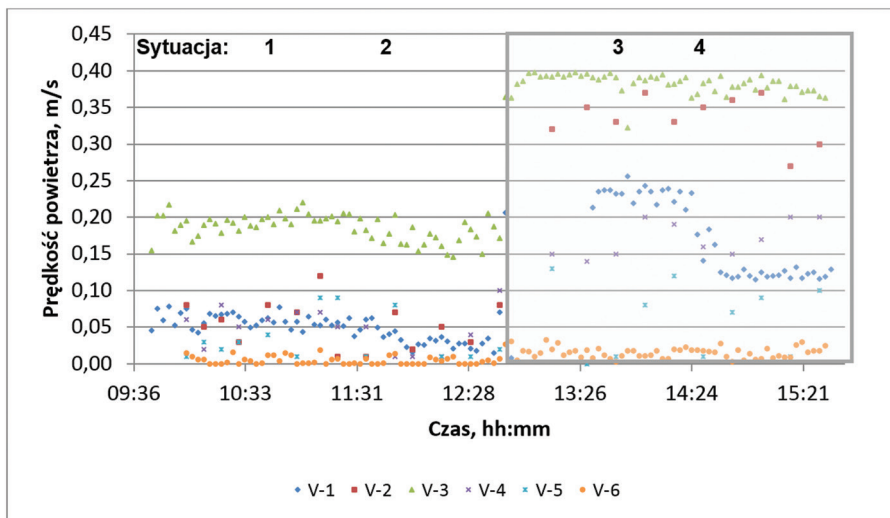


Rys. 10. Temperatura powietrza określona w sześciu punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne mierniki DiscMini; sytuacje 1 i 2 – dwa procesy mieszania, wyłączone dygestorium, sytuacje 3 i 4 – dwa procesy mieszania, włączone dygestorium (szary prostokąt)



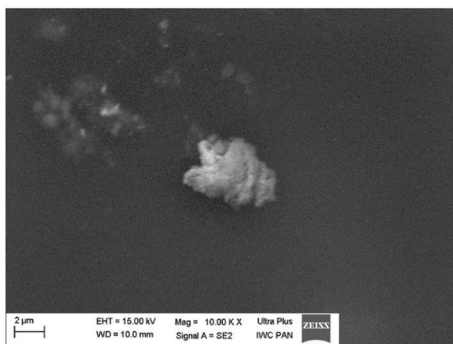
Rys. 11. Wilgotność względna powietrza określona w sześciu punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne mierniki DiscMini; sytuacje 1 i 2 – dwa procesy mieszania, wyłączone dygestorium, sytuacje 3 i 4 – dwa procesy mieszania, włączone dygestorium (szary prostokąt)



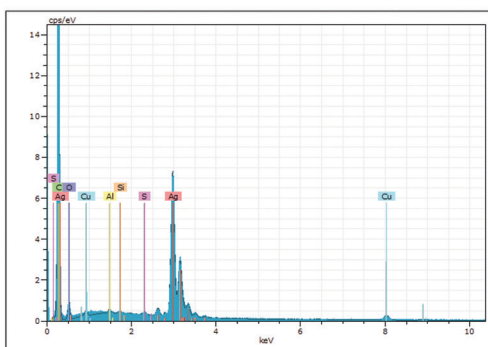


Rys. 12. Prędkość powietrza określona w sześciu punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne mierniki DiscMini; sytuacje 1 i 2 – dwa procesy mieszania, wyłączone dygestorium; sytuacje 3 i 4 – dwa procesy mieszania, włączone dygestorium (szary prostokąt)

a)

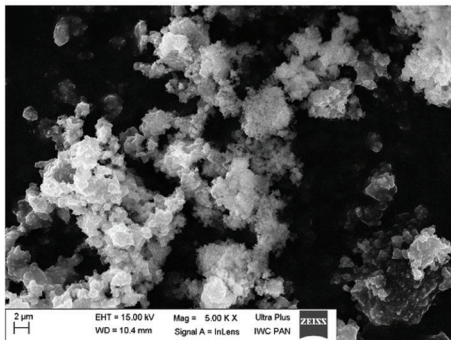


b)

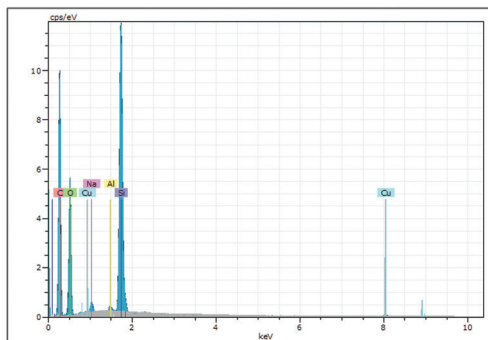


Rys. 13. Zdjęcie mikroskopowe o powiększeniu 10.00KX (a) oraz skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza przed procesami mieszania nanoproszków ditlenku krzemu (b); „tło” (S, C, Ag, O, Cu, Al, Si, Ag)

a)

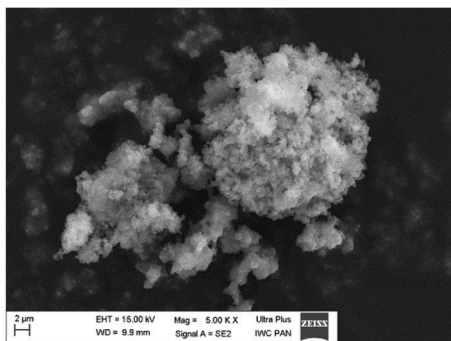


b)

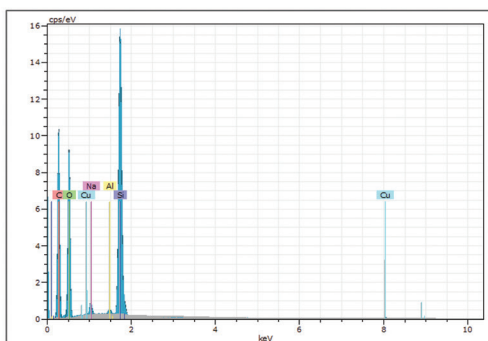


Rys. 14. Zdjęcie mikroskopowe o powiększeniu 5.00KX (a) oraz skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza podczas procesów mieszania nanoproszków ditlenku krzemu (b); włączone dygestorium (C, O, Cu, Na, Al, Si)

a)



b)



Rys. 15. Zdjęcie mikroskopowe o powiększeniu 5.00KX (a) oraz skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza podczas procesów mieszania nanoproszków ditlenku krzemu (b); włączone dygestorium (C, O, Cu, Na, Al, Si)

### 3.3. Omówienie wyników

Uzyskane wyniki badań umożliwiły wyciągnięcie następujących wniosków:

- ♦ gdy dygestorium było wyłączone, w pomieszczeniu występowała wentylacja zrównoważona, natomiast przy włączonym dygestorium w pomieszczeniu występowała wentylacja podciśnieniowa
- ♦ gdy dygestorium było wyłączone, do pomieszczenia napływało powietrze przefiltrowane w systemie filtrów (F7+H14), a zatem stężenia cząstek „tłā” były tam znacznie mniejsze niż wówczas, gdy dygestorium było włączone, a do pomieszczenia napływało przez kratkę wentylacji ogólnej nieprzefiltrowane powietrze atmosferyczne
- ♦ gdy dygestorium było wyłączone, w wyniku procesów mieszania nanoproszków ditlenku krzemu nastąpił 3,33 – 34,90-krotny wzrost stężeń liczbowych cząstek, natomiast przy włączonym dygestorium wzrost był 1,08 – 1,81-krotny
- ♦ gdy dygestorium było wyłączone, w wyniku procesów mieszania nanoproszków ditlenku krzemu nastąpił 2,33 – 40,00-krotny wzrost stężeń powierzchniowych cząstek, natomiast przy włączonym dygestorium wzrost był 1,03 – 1,56-krotny
- ♦ procesy mieszania nanoproszków ditlenku krzemu wpłynęły na zmniejszenie średnich wymiarów cząstek w odniesieniu do „tłā”; gdy dygestorium było wyłączone, średnie wymiary cząstek zmniejszyły się 1,27 – 1,64-krotnie, a przy włączonym dygestorium 1,04 – 1,15-krotnie
- ♦ gdy dygestorium było wyłączone, emitowane podczas procesów cząstki utrzymywały się w powietrzu pomieszczenia znacznie dłużej (nawet ponad 60 min) niż przy włączonym dygestorium (do ok. 30 min) – szczególnie dotyczy to punktów pomiarowych najbardziej oddalonych od źródła emisji cząstek oraz od dygestorium i kratki wentylacji ogólnej
- ♦ rozkłady wymiarów cząstek dla „tłā” i maksymalnych wartości stężeń podczas procesów mieszania znacznie różniły się między sobą; w przypadku cząstek „tłā” maksymalne wartości w rozkładach wymiarów były w zakresie 50 – 150 nm, natomiast dla cząstek odpowiadających maksymalnym stężeniom podczas procesów mieszania wynosiły do 40 nm; świadczy to

o wydzielaniu się podczas procesów mieszania nanoproszków znacznych ilości cząstek o małych wymiarach

- ♦ temperatura i wilgotność względna powietrza określane w sześciu punktach pomiarowych w pomieszczeniu różniły się znacznie, gdy dygestorium było wyłączone, i osiągały wartości do siebie zbliżone po włączeniu dygestorium
- ♦ zarówno w przypadku włączanego jak i wyłączanego dygestorium największe wartości prędkości występowały w pomieszczeniu w pobliżu dygestorium (punkt pomiarowy 3, patrz rys. 2 i 12), były one również większe od wartości określonych wewnątrz dygestorium (punkt pomiarowy 1); w punkcie pomiarowym najbardziej oddalonym od dygestorium zmiany wartości prędkości powietrza przy wyłączonym/włączonym dygestorium były nieznaczne (prędkość wynosiła tam do 0,05 m/s)
- ♦ podczas procesów mieszania w powietrzu występowały cząstki nanoproszków ditlenku krzemu, natomiast przed tymi procesami nie stwierdzono ich zawartości w powietrzu.

## 4. Zalecenia do profilaktyki technicznej

Rozprzestrzenianiu się NOAA w powietrzu w środowisku pracy zapobiega stosowanie właściwych środków ochrony zbiorowej [4-6, 10, 11]. Oczywiście najkorzystniejszym rozwiązaniem jest hermetyzacja procesów, w których są stosowane nanomateriały. Jeśli jednak nie jest to możliwe, powinny być zapewnione różne typy wentylacji miejscowej, w zależności od wymagań stawianych realizowanym procesom produkcyjnym. Wentylacja miejscowa powinna być zawsze wspomagana przez wentylację ogólną. Skuteczność systemów wentylacji jest w znacznym stopniu uzależniona od właściwych warunków ich użytkowania i konserwowania.

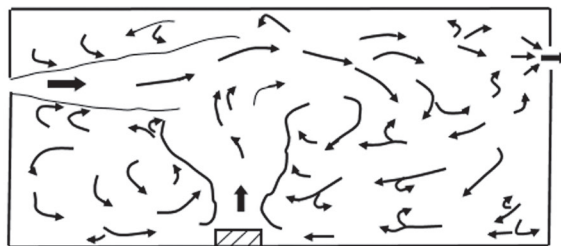
## 4.1. Wentylacja i klimatyzacja

Zadaniem wentylacji i klimatyzacji, w zależności od przeznaczenia pomieszczenia, jest:

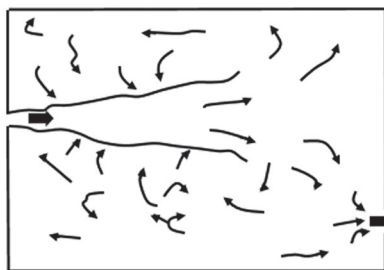
- ♦ utrzymywanie odpowiedniej czystości powietrza w poszczególnych pomieszczeniach, stosownie od ich przeznaczenia w odniesieniu do nanomateriałów
- ♦ zapewnienie odpowiedniej liczby wymian powietrza, w tym z uwzględnieniem ochrony przed NOAA
- ♦ uzyskanie i utrzymywanie właściwej temperatury, wilgotności względnej i prędkości powietrza
- ♦ zapewnienie właściwego układu ciśnienia powietrza w pomieszczeniach – przepływ powietrza z pomieszczeń o większych wymaganiach co do czystości powietrza w kierunku pomieszczeń o mniejszych wymaganiach
- ♦ eliminowanie możliwości wybuchu stosowanych materiałów.

Zapewnienie odpowiedniej jakości powietrza w danym pomieszczeniu powinno być realizowane 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), a następnie rozprowadzania w pomieszczeniu i/lub odciągania w miejscu emisji zanieczyszczeń, po czym wyrzucania powietrza oczyszczonego do atmosfery.

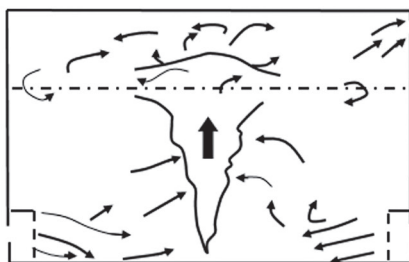
Rodzaj zastosowanej wentylacji lub klimatyzacji jest ściśle uzależniony od przeznaczenia pomieszczenia produkcyjnego lub laboratoryjnego i powinien zapewniać właściwy rozdział powietrza w pomieszczeniu. Na rysunku 16 przedstawiono elementy przepływowe rozdziału powietrza [9]. Niewłaściwy rozdział powietrza w pomieszczeniu może prowadzić do powstawania przestrzeni niewentylowanych [7] i w konsekwencji skutkować gromadzeniem się NOAA o znacznych stężeniach w różnych obszarach pomieszczenia.



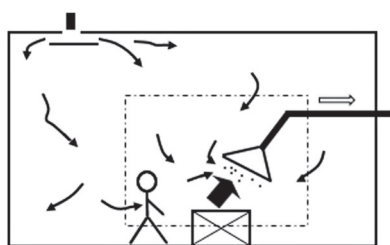
Elementy rozdziału powietrza w chaotycznym działaniu



Wentylacja mieszająca



Wentylacja wyporowa

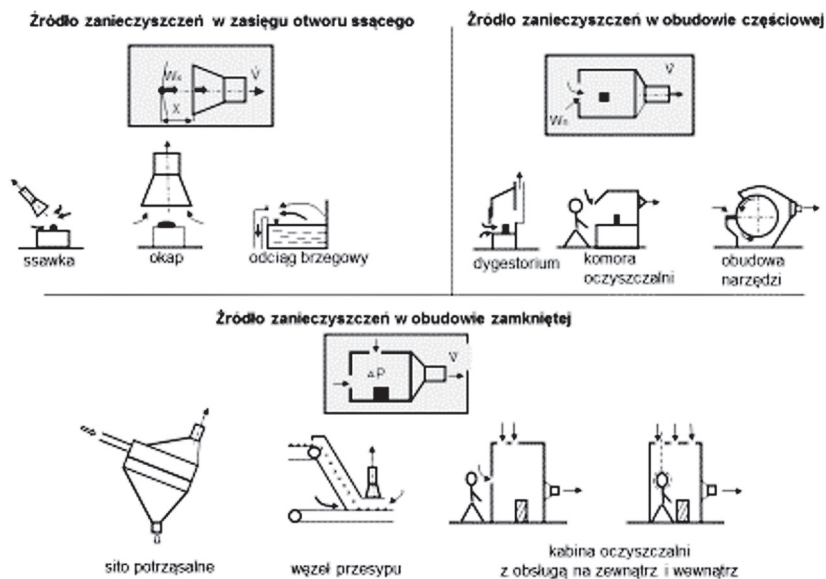


Wentylacja miejscowa

Rys. 16. Elementy przepływowe rozdziału powietrza [9]

W halach przemysłowych, w których na poszczególnych stanowiskach pracy są emitowane znaczne ilości cząstek, w tym NOAA, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest szczelne obudowanie rejonu ich emisji. W razie braku możliwości zastosowania całkowitego obudowania procesów technologicznych stosuje się obudowy częściowe albo instalacje wentylacji miejscowej wyposażone w ssawki

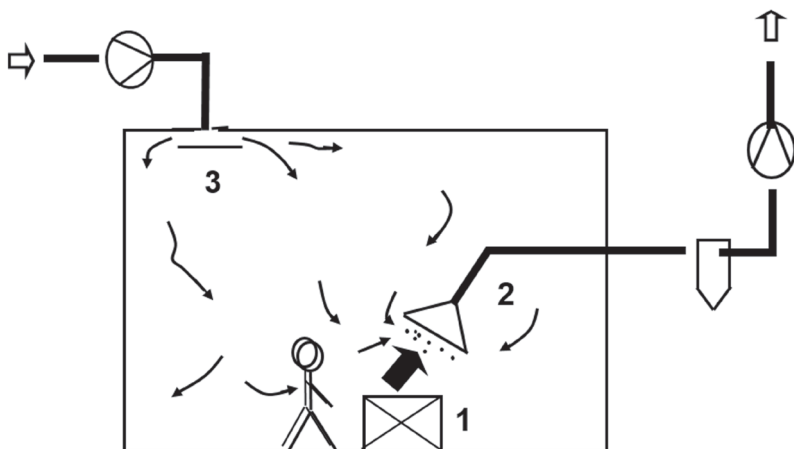
lub okapy (odciągi miejscowe), połączone z instalacją odpylającą albo urządzeniem filtracyjno-wentylacyjnym. Podział odciągów miejscowych według stopnia obudowania źródła emisji zanieczyszczeń jest przedstawiony na rysunku 17 [9].



Rys. 17. Podział odciągów miejscowych według stopnia obudowania źródła emisji zanieczyszczeń [9]

Stosowanie odciągów miejscowych powinno być wspomagane działaniem wentylacji ogólnej. W schemacie układu wentylacji przemysłowej (rys. 18) można zatem wyodrębnić trzy elementy uczestniczące w procesie zwalczania emisji cząstek, w tym NOAA, a mianowicie:

- 1) źródło emisji cząstek w wyniku prowadzenia procesu technologicznego
- 2) odciąg miejscowy, będący elementem wentylacji miejscowej, którego zadanie polega na chwytaniu emitowanych cząstek w celu usunięcia ich z pomieszczenia
- 3) urządzenie wentylacji nawiewnej, które ma uzupełnić powietrze usuwane z pomieszczenia w sposób korzystny dla warunków pracy i działania odciągów miejscowych [8].



Rys. 18. Schemat układu wentylacji przemysłowej [8]

Wentylacja miejscowa, często stosowana w laboratoriach badawczych, to wyciągi laboratoryjne (dygestoria), które powinny zapewnić wychwytywanie i usuwanie cząstek, w tym NOAA uwalniających się ze źródła znajdującego się wewnątrz przestrzeni roboczej wyciągu, przy minimalizacji ewentualnych zakłóceń spowodowanych przeciągami, ruchami obsługującego, przemieszczaniem się personelu [8].

Zalecenia w zakresie bezpieczeństwa i sprawności działania wyciągów laboratoryjnych są określone w normie PN-EN 14175-2:2006 [13], w której przedstawiono wymagania dotyczące:

- ♦ wymiarów wyciągu (całkowitej szerokości, głębokości i wysokości powierzchni roboczej)
- ♦ materiałów do wykonania elementów wyciągów (szczególnie elementów szklanych i okna przesuwne)
- ♦ konstrukcji wyciągu (przestrzeni roboczej, powierzchni roboczej, przegród, zaworów bezpieczeństwa, dostępu w celu konserwacji, podstawy wyciągu)
- ♦ okna przesuwne (robocze otwarcie, ogranicznik, zawieszenia, siły przesuwania, zabezpieczenia przed odpryskami, uchwytu)
- ♦ przepływu powietrza (wartości progowych, miernika przepływu powietrza)



- ♦ instalacji zasilających (wlotów, odprowadzenia cieczy, gniazd wtykowych, oświetlenia)
- ♦ instrukcji obsługi oraz znakowania i etykietowania.

Potwierdzeniem efektywności działania wyciągów laboratoryjnych pod kątem bezpieczeństwa i skuteczności ich działania są:

- ♦ badania typu, zgodnie z wymaganiami podanymi w normie PN-EN 14175-3:2006 [14]
- ♦ badania na stanowisku pracy, zgodnie z wymaganiami podanymi w normie PN-EN 14175-4:2006 [15], przy czym badania na stanowisku pracy dotyczą konkretnego wyciągu laboratoryjnego w danych warunkach otoczenia i ich wyników nie można odnosić do pozostałych wyciągów o tej samej konstrukcji lub tym samym wzorze.

Badania typu są prowadzone w pomieszczeniach i warunkach sprecyzowanych w normie [14] i obejmują: określenie przepływu powietrza (strumienia objętości powietrza odciąganego, prędkości ruchu powietrza w wyznaczonych punktach na wewnętrznej płaszczyźnie pomiaru), hermetyczności i wydajności wymiany powietrza (z zastosowaniem gazu wskaźnikowego w postaci sześćfluorku siarki – SF<sub>6</sub>) oraz spadku ciśnienia wyciągu laboratoryjnego, a także badania okna przesuwne, miernika przepływu powietrza, konstrukcji i materiałów oraz oświetlenia. Wyniki badania typu powinny być przedstawione w sprawozdaniu o zawartości określonej w normie [14].

Badania na stanowisku pracy są prowadzone w miejscu zainstalowania wyciągu laboratoryjnego. Stosuje się je w trakcie rozruchu wyciągu po jego zainstalowaniu, podczas konserwacji oraz do badań zgodności z wymaganiami. W normie [15] podano sposoby postępowania i wymagania dotyczące opracowania sprawozdania w odniesieniu do:

- ♦ badania rozruchowego wyciągu laboratoryjnego poddanego badaniu typu
- ♦ badania rutynowego wyciągów laboratoryjnych poddanych badaniu typu
- ♦ badania na zgodność z wymaganiami wyciągów laboratoryjnych niepoddanych badaniu typu.

A zatem, tylko wyciągi laboratoryjne spełniające wymagania zawarte w normach [13-15] i prawidłowo użytkowane mogą zapewnić właściwą ochronę pracowników przed narażeniem na NOAA. Podczas prac wykonywanych w wyciągach

laboratoryjnych szczególną uwagę należy zwrócić na działania prowadzone w obszarze roboczym wyciągu, aby swoją aktywnością nie doprowadzić do uwalniania się NOAA z dygestorium do pomieszczenia, np. nie należy gwałtownie wyjmować rąk z dygestorium. Istotne jest również obchodzenie się ze środkami ochrony stosowanymi podczas prac z nanomateriałami. Maski przeciwpyłowe, rękawice czy fartuchy należy zdejmować powoli i umieszczać je w miejscach przeznaczonych do ich przechowywania. Nie wolno wynosić tych środków poza pomieszczenie z dygestorium, w którym były prowadzone prace z nanomateriałami.

## 4.2. Filtry powietrza

Zarówno w systemach wentylacji ogólnej, jak i w urządzeniach wentylacji miejscowej elementami decydującymi o jakości powietrza odprowadzanego z pomieszczeń lub do nich doprowadzanego są układy oczyszczające jedno- lub wielostopniowe, zdeterminowane wymaganiami higienicznymi lub technologicznymi.

Podstawowymi wskaźnikami użytkowymi filtrów powietrza są: skuteczność filtracji i opory przepływu. Parametry te zależą od:

- ♦ właściwości cząstek (rozkładu ich wymiarów, stężenia, kształtu, właściwości chemicznych)
- ♦ właściwości przepływającego powietrza (temperatury, wilgotności, prędkości)
- ♦ parametrów strukturalnych filtru (konstrukcji, właściwości zastosowanego materiału filtracyjnego).

Skuteczność filtru jest parametrem określającym jego zdolność do oczyszczania powietrza z cząstek zanieczyszczeń o danym rozkładzie wymiarów. Opory przepływu filtru mają natomiast istotny wpływ na dobór urządzeń wprowadzających powietrze w ruch przy przepływie przez przegrodę filtrującą.

W zależności od wymaganego stopnia czystości powietrza doprowadzanego do pomieszczeń lub z nich odprowadzanego przez systemy wentylacyjne są stosowane różne układy filtracyjne projektowane na podstawie danych o parametrach użytkowych filtrów powietrza określonych podczas badań znormalizowanymi metodami stosowanymi do ich klasyfikacji.

Wymagania dotyczące metod badania i zasad klasyfikacji filtrów powietrza stosowanych do systemów wentylacji są określone w normach europejskich, które zostały wdrożone jako normy polskie. W normie PN-EN 779:2012 [16] opisano metody oraz stanowiska badawcze do pomiaru parametrów filtrów wstępnych (klasy G1-G4), filtrów średnich (klasy M5-M6) oraz filtrów dokładnych (klasy F7-F9), a w normach PN-EN 1822-1:2009 [17], PN-EN 1822-2:2009 [18], PN-EN 1822-3:2009 [19], PN-EN 1822-4:2009 [20] i PN-EN 1822-5:2009 [21] procedury i stanowiska badawcze do badania filtrów wysokoskutecznych (EPA, HEPA i ULPA).

Filtry wstępne (klasy G1-G4) zwykle są stosowane w systemach wentylacji pomieszczeń o przeciętnych wymaganiach dotyczących czystości powietrza (np. hotele, restauracje, domy towarowe, sale koncertowe) i w systemach pomieszczeń o wysokich wymaganiach odnoszących się do czystości powietrza jako filtr wstępny przed filtrami o wyższej skuteczności filtracji.

Filtry średnie (klasy M5-M6) i filtry dokładne (klasy F7-F9) są stosowane jako ostatni stopień filtracji w systemach wentylacji pomieszczeń o wysokich wymaganiach co do czystości powietrza (np. szpitale, kabiny lakiernicze, pomieszczenia czyste klasy 9, czy klasy 8 [23]) i w systemach pomieszczeń o bardzo wysokich wymaganiach odnośnie do czystości powietrza przed filtrami wysokoskutecznymi.

Wysokoskuteczne filtry powietrza EPA (klasy E10-E12), HEPA (klasy H13-H14) i ULPA (klasy U15-U17) są stosowane jako ostatni stopień filtracji w systemach wentylacji pomieszczeń czystych o klasach czystości wyższych niż 7 [23] (np. sterylne sale operacyjne, produkcja leków i surowic, produkcja taśm filmowych i magnetycznych, pomieszczenia produkcji mikroelektroniki). W przypadku bardzo wysokich wymagań stawianych czystości powietrza są wykorzystywane wielostopniowe układy filtracyjne (rys. 19).

Podział na klasy czystości pomieszczeń, wg PN-EN ISO 14644-1:2016 [23], przedstawiono w tabeli 12.



Rys. 19. Wielostopniowy układ filtracyjny

Tabela 12. Klasy czystości pomieszczeń wg PN-EN ISO 14644-1:2016 [23]

Numer klasy ISO (N)	Maksymalne dopuszczalne stężenie (cząstki/m <sup>3</sup> powietrza) dla cząstek o wielkości równej lub większej od:					
	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
1	10	–	–	–	–	–
2	100	24	10	–	–	–
3	1 000	237	102	35	–	–
4	10 000	2 370	1 020	352	83	–
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	–
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	–	–	–	352 000	83 200	2 930
8	–	–	–	3 520 000	832 000	29 300
9	–	–	–	35 200 000	8 320 000	293 000

Podziału filtrów powietrza na klasy dokonuje się na podstawie ich skuteczności filtracji, określonej z użyciem adekwatnych do typu badań aerozoli testowych.

Klasyfikację filtrów wstępnych (klasy G1-G4), filtrów średnich (klasy M5-M6) i filtrów dokładnych (klasy F7-F9) przedstawiono w tabeli 13.

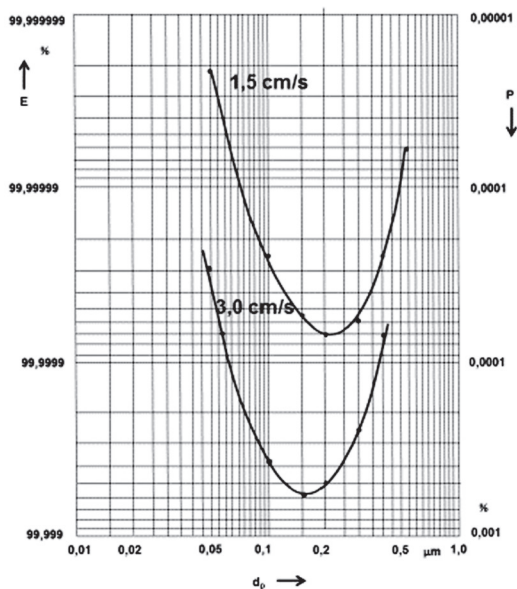
Tabela 13. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z normą PN-EN 779:2012 [16]

Grupa	Klasa	Końcowy opór przepływu, Pa	Średnie zatrzymanie ( $A_m$ ) pyłu syntetycznego, %	Średnia skuteczność ( $E_m$ ) dla cząstek 0,4 μm, %	Minimalna skuteczność dla cząstek 0,4 μm, %
Wstępne	G1	250	$50 \leq A_m < 65$	–	–
	G2	250	$65 \leq A_m < 80$	–	–
	G3	250	$80 \leq A_m < 90$	–	–
	G4	250	$90 \leq A_m$	–	–
Średnie	M5	450	–	$40 \leq E_m < 60$	–
	M6	450	–	$60 \leq E_m < 80$	–
Dokładne	F7	450	–	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	450	–	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	450	–	$95 \leq E_m$	70

Badania filtrów wysokoskutecznych typu EPA, HEPA i ULPA powinny obejmować następujące pomiary:

- 1) określenie minimalnej skuteczności materiału filtracyjnego, czyli dla cząstek najbardziej penetrujących badany materiał filtracyjny (MPPS) – rysunek 20, przykładowa zależność dla materiału filtracyjnego stosowanego w filtrze typu ULPA [17]
- 2) określenie przecieku filtru dla cząstek MPPS (wartości miejscowej skuteczności lub penetracji) [20]
- 3) określenie skuteczności filtru dla cząstek MPPS (wartości całkowitej skuteczności) [21]

Każdy z wymienionych pomiarów może być wykonywany jako niezależny.



Rys. 20. Przykładowa zależność skuteczności filtracji ( $E$ ) i penetracji ( $P$ ) materiału filtracyjnego stosowanego w filtrze powietrza typu ULPA jako funkcja średnicy cząstek,  $d_p$ , dla dwóch różnych prędkości przepływu [17]

Na podstawie wartości miejscowych skuteczności i penetracji [20], a także wartości całkowitych skuteczności i penetracji [20, 21], jest określana klasa filtru zgodnie z tabelą 14 [17].

Tabela 14. Klasyfikacja filtrów powietrza typu EPA, typu HEPA i typu ULPA zgodnie z PN-EN 1822-1:2009 [17]

Klasa filtru	Całkowita		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	≥ 99,999 5	≤ 0,000 5	≥ 99,997 5	≤ 0,002 5
U 16	≥ 99,999 95	≤ 0,000 05	≥ 99,999 75	≤ 0,000 25
U 17	≥ 99,999 995	≤ 0,000 005	≥ 99,999 9	≤ 0,000 1

Analizując krzywe przedstawione na rysunku 20, można stwierdzić, co zostało również potwierdzone badaniami dla wybranych NOAA [3-12], że cząstki o wymiarach większych i mniejszych od MPPS są zatrzymywane w filtrach powietrza z większą skutecznością niż cząstki MPPS. Na przykład filtr klasy H13 o skuteczności całkowitej 99,95% dla cząstek MPPS zatrzymuje cząstki o mniejszych i większych wymiarach ze skutecznością powyżej 99,95%.

Oprócz instalowania w systemach wentylacji filtrów powietrza o wysokiej skuteczności oczyszczania z NOAA należy zapewnić nadzór nad pracą tych filtrów i ich wymianę w odpowiednich odstępach czasu, tak by nie dopuścić do reemisji NOAA z filtrów, zarówno do powietrza w pomieszczeniach jak i do środowiska naturalnego. Należy również zapewnić usuwanie filtrów z instalacji w taki sposób, by nie było możliwe uwalnianie się z nich cząstek, szczególnie NOAA. Filtry usunięte z instalacji powinny być utylizowane w sposób właściwy dla odpadów zawierających substancje niebezpieczne.

## 5. Bibliografia

1. Brouwer D., Berges M., Virji MA., Fransman W., Bello D., Hodson L., Gabriel S., Tielemans E.: *Harmonization of Measurement Strategies for Exposure to Manufactured Nano-Objects. Report of a Workshop*. Ann. Occup. Hyg., 2012, Vol. 56, No. 1, 1-9.
2. Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial. (Text with EEA relevance) (2011/696/EU). OJ L 275/38 z 20.10.2011.
3. Heim M., Mullins B., Wild M., Meyer J., Kasper G.: *Filtration efficiency of aerosol particles below 20 nanometers*. Aerosol Science and Technology, 39, 2005, 782-789.
4. HSE. *Health effects of particles produced for nanotechnologies*. 2004. [www.hse.gov.uk/horizons/nanotech/healtheffects.pdf](http://www.hse.gov.uk/horizons/nanotech/healtheffects.pdf).
5. IRSST. *Best Practices Guide to Synthetic Nanoparticle Risk Management. Report R-599, 2009*.
6. IRSST. *Nanoparticles: Actual knowledge about occupational health and safety risks and prevention measures*. R-470, ISBN 13: 978-2-89631-063-0, ISBN 10: 2-89631-063-0, 2006. [www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-470.pdf](http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-470.pdf).
7. Jankowska E., Jankowski T., Kondej D.: *Badanie obszarów wentylowanych i niewentylowanych w pomieszczeniach pracy*. Bezpieczeństwo Pracy, 2003, nr 1, 17-19.
8. Mierzwiński S.: *Aerodynamika wentylacji ogólnej*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2007.
9. 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].
10. Nanosafe2. *Safe production and use of nanomaterials – Dissemination report DR-325/326-200801-1, 2008*.
11. VDI. *Industrial application of nanomaterials – chances and risks*. Results of the EU funded project NANOSAFE. 2004.
12. Wang J., Chen D., Pui D.: *Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media*. Journal of Nanoparticle Research, 2007, 9, 109-115.

13. PN-EN 14175-2:2006 *Wyciągi laboratoryjne. Część 2: Wymagania bezpieczeństwa i sprawności działania.*
14. PN-EN 14175-3:2006 *Wyciągi laboratoryjne. Część 3: Metody badania typu.*
15. PN-EN 14175-4:2006 *Wyciągi laboratoryjne. Część 4: Metody badań na stanowisku pracy.*
16. PN-EN 779:2012 *Przeciwpyłowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Określanie parametrów filtracyjnych.*
17. PN-EN 1822-1:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 1: Klasyfikacja, badanie parametrów, znakowanie.*
18. PN-EN 1822-2:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 2: Wytwarzanie aerozolu, przyrządy pomiarowe, statystyka zliczania cząstek.*
19. PN-EN 1822-3:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 3: Badanie płaskiego materiału filtracyjnego.*
20. PN-EN 1822-4:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 4: Określanie przecieku filtru (metoda przeszukiwania).*
21. PN-EN 1822-5:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 5: Określanie skuteczności filtru.*
22. PN-EN ISO 14644-1:2016 *Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane. Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek.*
23. PN-EN 12599:2013-04 *Wentylacja budynków – Procedury badań i metody pomiarowe stosowane podczas odbioru instalacji wentylacji i klimatyzacji.*



