



**ELŻBIETA JANKOWSKA
TOMASZ JANKOWSKI**

**STRATEGIA BADANIA
ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ
NANOObIEKTÓW ORAZ ICH
AGLOMERATÓW I AGREGATÓW
(NOAA) W ŚRODOWISKU PRACY**

Elżbieta Jankowska, Tomasz Jankowski

**Strategia badania
rozprzestrzeniania się nanoobjektów
oraz ich aglomeratów i agregatów (NOAA)
w środowisku pracy**

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.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy

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

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



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

Spis treści

1. Informacja ogólna	5
2. Źródła emisji NOAA i pomiar parametrów cząstek	5
3. Wentylacja pomieszczeń i pomiar strumieni objętości powietrza	7
4. Parametry powietrza i ich pomiar	8
5. Przykładowe strategie badania rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu środowiska pracy	9
5.1. Zasady ogólne	9
5.2. Strategia badania rozprzestrzeniania się NOAA pochodzących z procesów ze specjalnie wytworzonym materiałem – mieszanie nanoproszków ditlenku krzemu (SiO_2)	10
5.3. Strategia badania rozprzestrzeniania się NOAA pochodzących z przypadkowego źródła – stosowanie rurek zadymiających	15
5.4. Strategia badania rozprzestrzeniania się NOAA pochodzących ze źródeł naturalnych – napływ cząstek z powietrza atmosferycznego do pomieszczenia	21
6. Bibliografia	26



1. Informacja ogólna

Celem badania rozprzestrzeniania się nanoobjektów oraz ich aglomeratów i agregatów (NOAA) w środowisku pracy jest określanie możliwości powstania zagrożenia zdrowia pracowników wykonujących czynności związane z produkowaniem lub stosowaniem nanomateriałów oraz zagrożenia zdrowia pracowników niewykonujących takich czynności, lecz pracujących na stanowiskach znajdujących się w tych samych pomieszczeniach w różnej odległości od źródeł emisji NOAA.

Badanie rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu pomieszczeń pracy może być przeprowadzane pod kątem oceny wpływu różnych parametrów, zależnych od rodzaju i umiejscowienia źródła NOAA, stosowanych środków ochrony zbiorowej (przede wszystkim stosowanej wentylacji mechanicznej) oraz parametrów powietrza (temperatury, wilgotności względnej i prędkości).

2. Źródła emisji NOAA i pomiar parametrów cząstek

Zgodnie z definicją podaną przez UE [3] nanomateriał to powstały naturalnie bądź wytworzony przypadkowo lub specjalnie materiał zawierający cząstki, które występują pojedynczo albo jako agregaty bądź aglomeraty (NOAA), oraz 50% spośród nich, lub więcej, w liczbowym rozkładzie wymiarów ma co najmniej jeden zewnętrzny wymiar w zakresie 1 – 100 nm. W kontekście definicji nanomateriału należy rozpatrywać trzy rodzaje źródeł emisji cząstek o nanowymiarach [1]:

- ♦ **procesy ze specjalnie wytworzonymi nanomateriałami**, tzn. wytwarzanie nanomateriałów 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. źródła, 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 powietrza 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 do badanego pomieszczenia, z powietrzem atmosferycznym, NOAA, których stężenia i wymiary mogą się znacznie różnić nawet w ciągu jednego dnia, również w przypadku zdarzeń mogących wystąpić w znacznej odległości od badanego pomieszczenia pracy, np. na skutek wybuchu wulkanu.

Wyniki badań uzyskane w ramach realizacji projektów badawczych¹ wykazały, że wpływ umiejscowienia źródeł emisji NOAA na ich rozprzestrzenianie się w powietrzu pomieszczenia pracy należy rozpatrywać wspólnie z wpływem działającej w danym momencie wentylacji mechanicznej, przede wszystkim wentylacji miejscowej. Można więc rozpatrywać następujące sytuacje w odniesieniu do usytuowania źródeł emisji NOAA:

- ♦ źródło NOAA znajduje się w miejscu wpływu wentylacji mechanicznej miejscowej, tzn. prace podczas wytwarzania i/lub stosowania nanometariałów są prowadzone np. wewnątrz włączonego dygestorium
- ♦ źródło NOAA znajduje się w pomieszczeniu poza bezpośrednim wpływem wentylacji mechanicznej miejscowej, tzn. prace podczas wytwarzania i/lub stosowania nanometariałów są prowadzone w miejscu, w którym nie jest zapewnione odciążenie NOAA u źródła.

Parametrami cząstek o nanowymiarach istotnymi ze względu na zagrożenie pracowników przez NOAA są:

- ♦ **stężenie liczbowe cząstek**, określane np. z użyciem kondensacyjnego licznika cząstek P-Trak (20 – 1000 nm), przenośnego miernika DiscMini (10 – 700 nm)

¹ Projekt II.P.02/TSB: *Badanie procesu rozprzestrzeniania się nanoobjektów w powietrzu pomieszczeń pracy oraz projekt europejski SCAFFOLD, NMP4-SL-2012-280535.*

- ♦ **stężenie powierzchniowe cząstek**, określane np. z użyciem miernika Aero-Trak (10 – 1000 nm), przenośnego miernika DiscMini (10 – 700 nm)
- ♦ **średni wymiar cząstek**, określane np. z użyciem przenośnego miernika DiscMini (10 – 300 nm)
- ♦ **kształty i skład chemiczny cząstek**, określane np. z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) z detektorem EDS dla cząstek zawartych w próbkach powietrza pobranych próbnikiem, np. NAS (TSI).

3. Wentylacja pomieszczeń i pomiar strumieni objętości powietrza

Pomieszczenia, w których są wykonywane prace z nanomateriałami, powinny być wyposażone w wentylację mechaniczną zapewniającą odciąganie NOAA u potencjalnych źródeł ich emisji oraz właściwy rozdział powietrza w pomieszczeniach. Jest to możliwe dzięki zainstalowaniu właściwie współdziałającej wentylacji mechanicznej ogólnej i miejscowej [2]. Nieodpowiednio działająca wentylacja mechaniczna ogólna może spowodować niewłaściwy rozdział powietrza w pomieszczeniu, a w konsekwencji powstawanie obszarów niewentylowanych i gromadzenie się NOAA o znacznych stężeniach w różnych obszarach tego pomieszczenia. Brak wentylacji miejscowej lub stosowanie wentylacji nieefektywnej (np. dygestorium) w pobliżu źródła NOAA może skutkować ich rozprzestrzenieniem się w powietrzu pomieszczenia. Należy rozważyć zastosowanie wentylacji miejscowej w pełni zabezpieczającej przed emisją NOAA, np. komory rękawicowej (ang. *glove box*), wszędzie, gdzie to jest możliwe.

Podstawowymi parametrami stosowanymi do określania rodzaju występującej w pomieszczeniu wentylacji (podciśnieniowa, zrównoważona, nadciśnieniowa) oraz do obliczania krotności wymian powietrza są strumień objętości powietrza nawiewanego do pomieszczenia i z niego wywiewanego. W danym pomieszczeniu można stosować różny rozdział powietrza w zależności od tego, czy zainstalowa-

ne systemy wentylacji zostały włączone, czy wyłączone i jakie jest współdziałanie mechanicznej wentylacji ogólnej i miejscowej.

Ze względu na stan powietrza w pomieszczeniu po włączeniu/wyłączeniu systemów wentylacji mechanicznej występuje tam:

- ✦ **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.

Strumienie objętości powietrza nawiewanego do pomieszczeń i z nich wywiewanego są określane w wyniku pomiaru prędkości przepływu powietrza w przewodach, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN12599:2013-04 [4], z użyciem np. wielofunkcyjnego przyrządu TESTO czy VelociCalc (TSI). Gdy systemy wentylacji są wyposażone w otwory wentylacyjne, takie jak np. kratki wentylacyjne, pomiary prędkości wykonuje się na przykład z użyciem wielofunkcyjnego przyrządu TESTO z sondą wiatraczkową.

4. Parametry powietrza i ich pomiar

Parametrami istotnymi podczas badania rozprzestrzeniania się NOAA są parametry powietrza, w którym te NOAA są zawieszane lub unoszone, tzn. jego **temperatura, wilgotność względna i prędkość przepływu**. Szczególnie istotny wpływ na rozprzestrzenianie się NOAA w powietrzu może mieć prędkość jego przepływu.

Parametry powietrza mogą być określane na przykład z użyciem wielofunkcyjnych przyrządów TESTO, VelociCalc (TSI), termohigrobarometów (LAB-EL).

5. Przykładowe strategie badania rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu środowiska pracy

5.1. Zasady ogólne

Badanie rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu w pomieszczeniu pracy wykonywano zgodnie z metodyką opracowaną w CIOP-PIB². Określano:

- 1) „tła” cząstek o nanowymiarach w wybranych punktach pomiarowych w pomieszczeniu, czyli wykonywano pomiary parametrów NOAA w czasie reprezentatywnym dla sytuacji, kiedy nie występuje ich emisja z żadnego z trzech rodzajów źródeł (z procesu z nanomateriałem, ze źródła przypadkowego, ze źródła naturalnego)
- 2) emisję NOAA z jednego z trzech wymienionych źródeł, przez pomiary bezpośrednio w okolicy źródła (w odległości do 30 cm od źródła)
- 3) rozprzestrzenianie się NOAA z jednego z trzech wymienionych źródeł ich emisji przez wykonywanie pomiarów w pozostałych, reprezentatywnych punktach pomiarowych zlokalizowanych w pomieszczeniu
- 4) utrzymywanie się w powietrzu NOAA wyemitowanych z jednego z trzech wymienionych źródeł ich emisji przez pomiary we wszystkich (określonych w p. 2 i 3) punktach pomiarowych rozmieszczonych w pomieszczeniu, po zakończeniu emisji NOAA.

Podczas pomiaru parametrów cząstek („tła”, emisji, rozprzestrzeniania się i utrzymywania się w powietrzu) mierzono parametry powietrza w tych samych punktach pomiarowych, w których określano parametry cząstek.

Przed rozpoczęciem pomiarów parametrów cząstek i parametrów powietrza wykonano pomiary prędkości powietrza w przewodach wentylacyjnych lub na kratkach wentylacyjnych i określono strumienie objętości powietrza nawiewanego do badanego pomieszczenia i z niego wywiewanego.

² Projekt II.P02/TSB: *Badanie procesu rozprzestrzeniania się nanoobjektów w powietrzu pomieszczeń pracy.*

Ocenę wyników badania rozprzestrzeniania się cząstek przeprowadzono na podstawie:

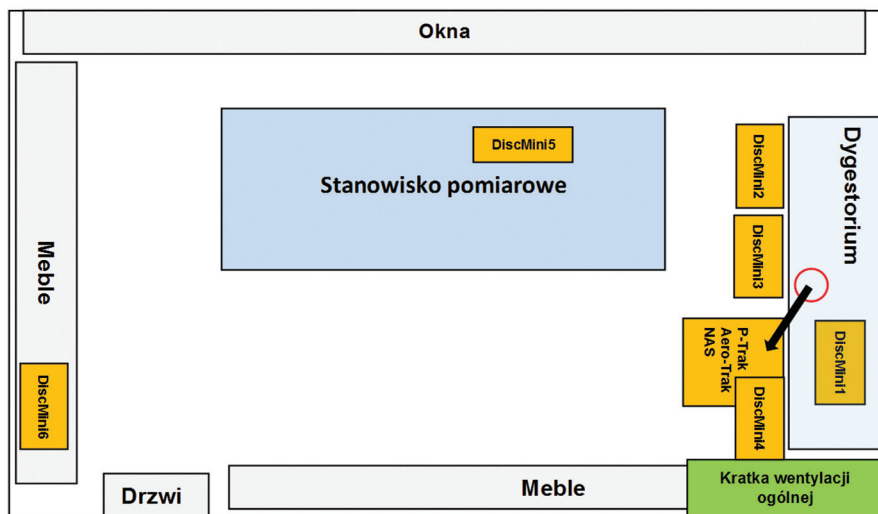
- ♦ analizy zmian stężeń cząstek w zależności od rodzaju źródła NOAA, parametrów powietrza i stosowanej w pomieszczeniu wentylacji – określenie wskaźników zmian stężeń cząstek z wykorzystaniem maksymalnych wartości stężeń podczas emisji NOAA i wartości stężeń cząstek „tła” w poszczególnych punktach pomiarowych
- ♦ analizy zmian średnich wymiarów cząstek podczas emisji NOAA ze źródeł w odniesieniu do średnich wymiarów cząstek „tła” – określenie wskaźników zmian średnich wymiarów cząstek z wykorzystaniem wartości ekstremalnych oznaczonych podczas emisji ze źródeł i wartości średnich wymiarów cząstek „tła” w poszczególnych punktach pomiarowych
- ♦ potwierdzenia lub wykluczenia zawartości w powietrzu NOAA emitowanych ze źródeł.

5.2. Strategia badania rozprzestrzeniania się NOAA pochodzących z procesów ze specjalnie wytworzonym nanomateriałem – mieszanie nanoproszków ditlenku krzemu (SiO_2)

Stosując opracowaną metodykę, przeprowadzono badania rozprzestrzeniania się NOAA podczas mieszania trzech rodzajów nanomateriałów, a mianowicie: nanocząstek ditlenku krzemu (SiO_2), nanopłytek glinokrzemianu warstwowego – *nanoclay bentonite* oraz nanorurek węglowych – *multi-wall nanotubes MWCNTs 30-50*.

Dalej omówiono przykładową strategię prowadzenia badań podczas przebiegu procesów mieszania nanoproszku ditlenku krzemu (SiO_2) w dygestorium. Badania rozprzestrzeniania się NOAA w powietrzu pomieszczenia, w którym było umiejscowione dygestorium, wykonano przed, podczas, pomiędzy i po procesach mieszania każdego z nanoproszków, przy wyłączonym i włączonym dygestorium. Określano stężenia liczbowe, stężenia powierzchniowe oraz średnie wymiary cząstek, a także parametry powietrza (temperaturę, wilgotność względną i prędkość). W pobliżu źródła emisji NOAA pobrano próbki powietrza do ich dalszej analizy

z użyciem mikroskopu elektronowego SEM z detektorem EDS. Sposób umiejscowienia przyrządów pomiarowych (P-Trak, Aero-Trak, sześć przyrządów DiscMini i NAS) stosowanych podczas badań stężeń i wymiarów cząstek przedstawiono na rysunku 1. Numery przyrządów DiscMini odpowiadają numerom punktów pomiarowych.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w pomieszczeniu podczas badania rozprzestrzeniania się cząstek emitowanych w wyniku mieszania nanoprošków ditlenku krzemu; czerwone kółko oznacza miejsce mieszania nanoprošków

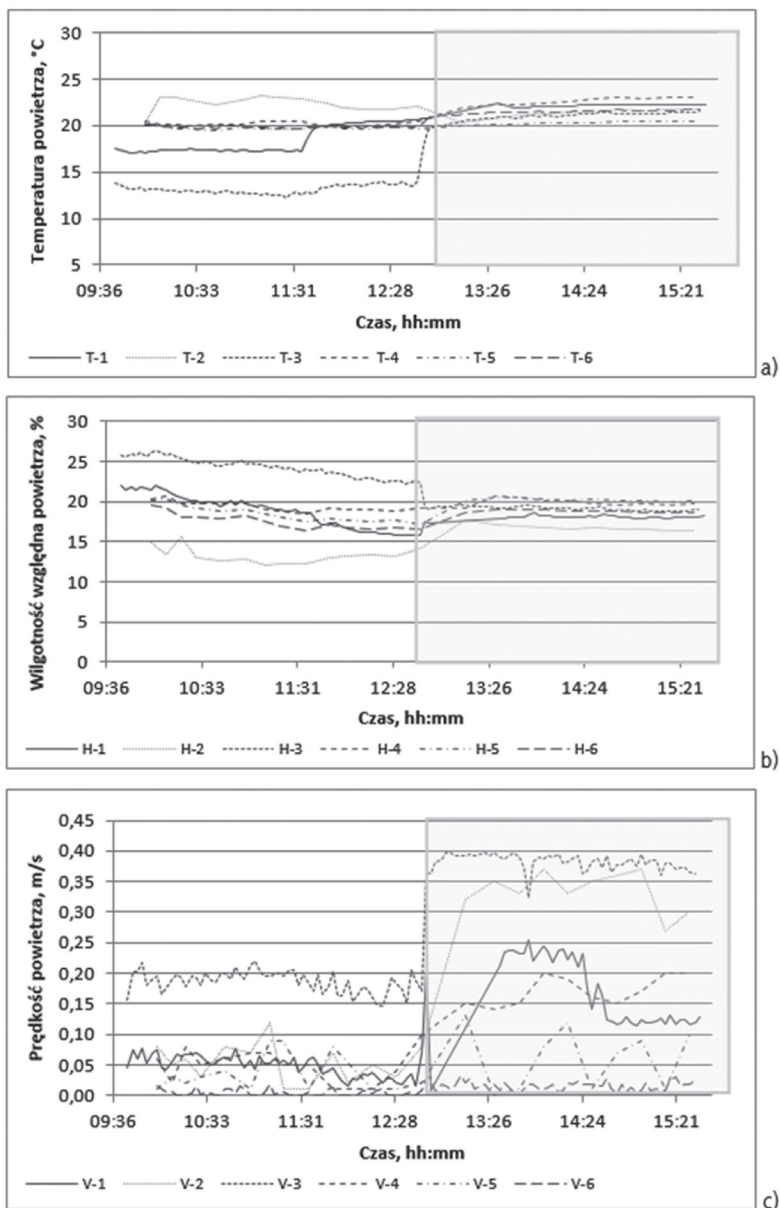
Wartości strumieni objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego z pomieszczenia wynosiły odpowiednio $152 \text{ m}^3/\text{h}$ i $141 \text{ m}^3/\text{h}$, gdy dygestorium było wyłączone (wentylacja zrównoważona) oraz $342 \text{ m}^3/\text{h}$ i $958 \text{ m}^3/\text{h}$, gdy było włączone (wentylacja podciśnieniowa). Wentylacja mechaniczna ogólna była wyłączona (przepustnica otwarta), a drzwi i okna zamknięte.

W tabeli 1 podano wyniki obliczeń wskaźników zmienności (wzrostu) stężeń liczbowych i stężeń powierzchniowych oraz zmienności (zmniejszenia) średnich wymiarów cząstek – w wyniku procesów mieszania nanoprošków – określonych w sześciu punktach pomiarowych zlokalizowanych w badanym pomieszczeniu, dla wyłączonego i włączonego dygestorium.

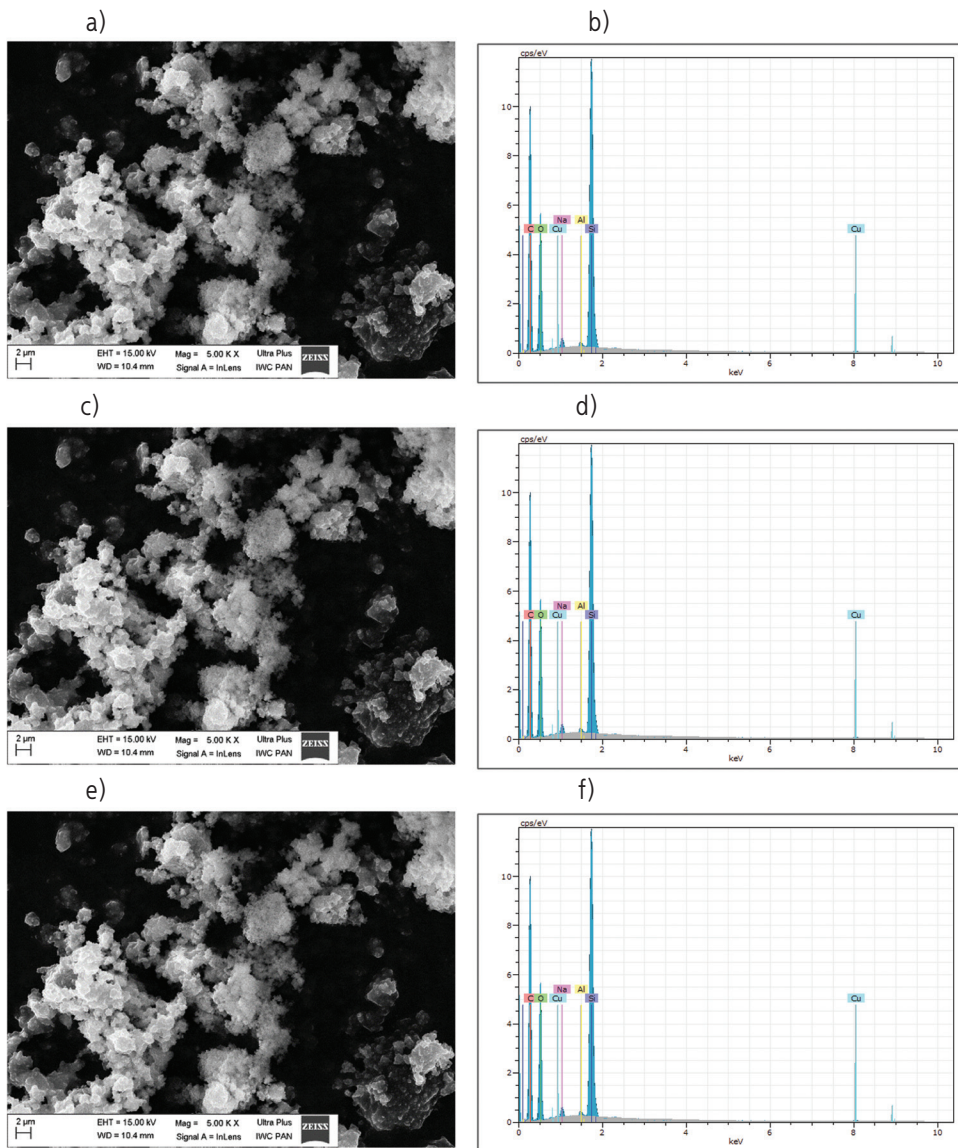
Tabela 1. Wyniki obliczeń wskaźników zmienności stężeń liczbowych, stężeń powierzchniowych i średnich wymiarów cząstek podczas mieszania nanoproszków ditlenku krzemu przy wyłączonym i włączonym dygestorium

Przyrząd pomiarowy	Wskaźniki zmienności stężenia liczbowego cząstek w wyniku mieszania SiO ₂		Wskaźniki zmienności stężenia powierzchniowego cząstek w wyniku mieszania SiO ₂		Wskaźniki zmienności średniego wymiaru cząstek w wyniku mieszania SiO ₂	
	Dygestorium					
	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone
DiscMini1 (10 – 700 nm)	20,75	1,59	10,00	1,27	164	113
DiscMini2 (10 – 700 nm)	24,18	1,48	15,57	1,25	148	104
DiscMini3 (10 – 700 nm)	34,90	1,81	4000	1,56	141	115
DiscMini4 (10 – 700 nm)	26,17	1,53	15,158	1,25	157	111
DiscMini5 (10 – 700 nm)	2,81	1,08	2,33	1,03	127	107
DiscMini6 (10 – 700 nm)	3,29	1,11	2,47	1,03	128	108
P-Trak (20 – 1000 nm)	3,33	1,08	–	–	–	–
Aero-Trak (10 – 1000 nm)	–	–	5,00	1,04	–	–

Wykresy zmienności parametrów powietrza (temperatury, wilgotności względnej i prędkości) podczas badań przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku 3 zamieszczono zdjęcia mikroskopowe i skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza w punkcie pomiarowym 1, przed mieszaniem SiO₂ („tło”) i podczas mieszania, gdy dygestorium było wyłączane/włączone.



Rys. 2. Parametry powietrza określone w sześciu punktach pomiarowych, w których umieszczono przenośne mierniki DiscMini, przed procesami mieszania nanoproczków ditlenku krzemu, w ich trakcie i po procesach mieszania; dygestorium wyłączone i włączone (szary prostokąt): a) temperatura, b) wilgotność względna, c) prędkość powietrza



Rys. 3. Zdjęcia mikroskopowe (a, c, e) oraz skład chemiczny (b, d, f) cząstek pobranych z powietrza:

- przed procesami mieszania SiO_2 – „tło”: a) zdjęcie o powiększeniu 10.00KX, b) skład chemiczny: S, C, Ag, O, Cu, Al, Si
- podczas mieszania SiO_2 ; dygestorium wyłączone: c) zdjęcie o powiększeniu 5.00KX, d) skład chemiczny: C, O, Cu, Na, Al, Si
- podczas mieszania SiO_2 ; dygestorium włączone: e) zdjęcie o powiększeniu 5.00KX, f) skład chemiczny: C, O, Cu, Na, Al, Si

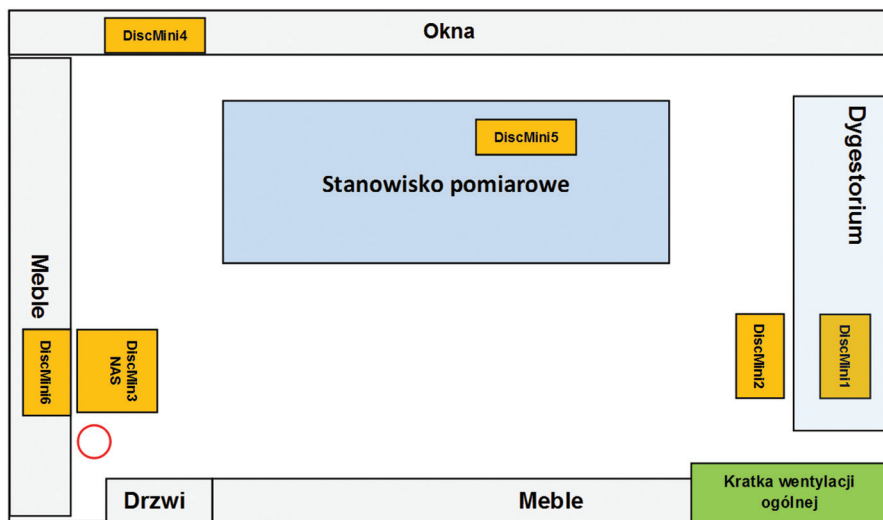
Wyniki badań wskazują, że:

- ♦ w przypadku wyłączonego dygestorium w pomieszczeniu była wentylacja zrównoważona, natomiast przy włączonym dygestorium – podciśnieniowa
- ♦ procesy mieszania wpłynęły na wzrost stężeń liczbowych i stężeń powierzchniowych cząstek oraz na zmniejszenie ich średnich wymiarów
- ♦ wskaźniki wzrostu stężeń liczbowych w wyniku procesów mieszania SiO_2 zawierały się w zakresie 2,81 – 34,90 przy wyłączonym dygestorium i w zakresie 1,08 – 1,81 przy włączonym
- ♦ wskaźniki wzrostu stężeń powierzchniowych w wyniku procesów mieszania SiO_2 zawierały się w zakresie 2,33 – 40,00 przy wyłączonym dygestorium i w zakresie 1,03 – 1,56 przy włączonym
- ♦ wskaźniki zmniejszenia średnich wymiarów cząstek w wyniku procesów mieszania SiO_2 zawierały się w zakresie 1,27 – 1,64 przy wyłączonym dygestorium i w zakresie 1,04 – 1,15 przy włączonym
- ♦ parametry powietrza określone 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 włączonego, jak i wyłączonego dygestorium największe wartości prędkości występowały w pomieszczeniu w pobliżu dygestorium (punkt pomiarowy 3, patrz rys. 1); wartości te były większe od określonych wewnątrz dygestorium (punkt pomiarowy 1)
- ♦ podczas procesów mieszania w powietrzu były zawarte cząstki ditlenku krzemu, natomiast w próbkach pobranych przed tymi procesami nie stwierdzono ich obecności.

5.3. Strategia badania rozprzestrzeniania się NOAA pochodzących z przypadkowego źródła – stosowanie rurek zadymiających

W pomieszczeniu, w pobliżu drzwi (rys. 4), generowano dym kwasu siarkowego z rurek zadymiających firmy Dräger, które są powszechnie stosowane do wizualizacji przepływu powietrza podczas określania rozdziału powietrza w pomieszczeniu. Dym generowano w dwóch sytuacjach: A – gdy wentylacja ogólna

i miejscowa były wyłączone, B – gdy wentylacja ogólna i miejscowa były włączone. W obydwu sytuacjach dym generowano dziesięciokrotnie.



Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w pomieszczeniu podczas badania rozprzestrzeniania się cząstek emitowanych w wyniku stosowania rurek zadymiających; czerwone kołko oznacza miejsce stosowania rurek zadymiających

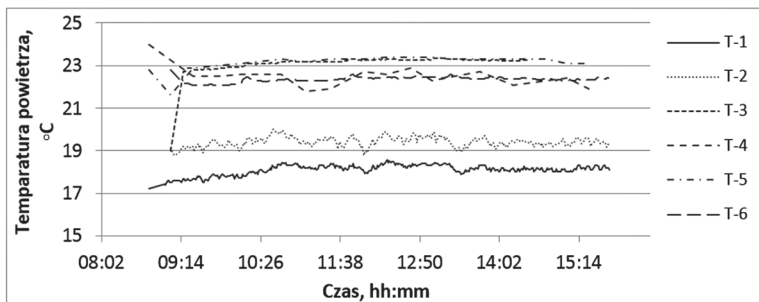
Wartości strumieni objętości powietrza nawiewanego do pomieszczenia i z niego wywiewanego wynosiły odpowiednio $84 \text{ m}^3/\text{h}$ i $107 \text{ m}^3/\text{h}$, gdy wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) były wyłączone (wentylacja zrównoważona), oraz $326 \text{ m}^3/\text{h}$ i $956 \text{ m}^3/\text{h}$, gdy wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) były włączone (wentylacja podciśnieniowa). Podczas badań drzwi i okna były zamknięte.

W tabeli 2 podano wyniki obliczeń wskaźników zmienności (wzrostu) stężeń liczbowych cząstek, ich stężeń powierzchniowych i średnich wymiarów określonych w sześciu punktach pomiarowych zlokalizowanych w badanym pomieszczeniu, z użyciem przyrządów DiscMini.

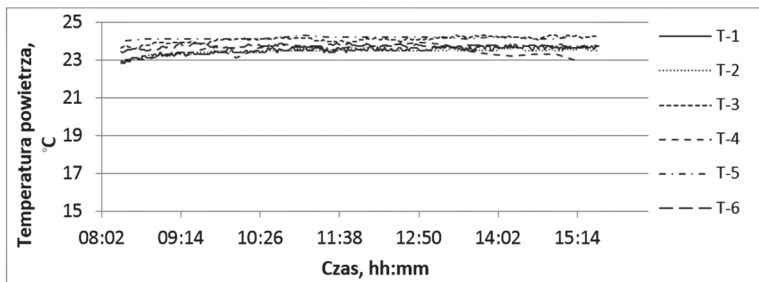
Tabela 2. Wyniki obliczeń wskaźników zmienności (wzrostu) stężeń liczbowych, stężeń powierzchniowych i średnich wymiarów cząstek podczas generowania dymu: sytuacja A – wyłączona wentylacji ogólna i miejscowa (dygestorium), sytuacja B – włączona wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium)

Przyrząd pomiarowy	Wskaźniki zmienności stężenia liczbowego cząstek w wyniku generowania dymu		Wskaźniki zmienności stężenia powierzchniowego cząstek w wyniku generowania dymu		Wskaźniki zmienności średniego wymiaru cząstek w wyniku generowania dymu	
	Wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium)					
	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone	wyłączone	włączone
DiscMini1 (10 – 700 nm)	11,25	3,25	21,14	8,73	2,34	2,83
DiscMini2 (10 – 700 nm)	13,54	418	24,29	8,55	2,36	2,21
DiscMini3 (10 – 700 nm)	8,96	66,11	20,82	191,90	2,29	3,66
DiscMini4 (10 – 700 nm)	8,33	3,20	18,06	10,36	2,34	3,79
DiscMini5 (10 – 700 nm)	11,73	3,99	20,33	10,45	2,25	2,74
DiscMini6 (10 – 700 nm)	8,97	12,07	20,25	36,80	2,31	4,00

Wykresy zmienności parametrów powietrza (temperatury, wilgotności względnej i prędkości) w sytuacji A (gdy wentylacja ogólna i miejscowa były wyłączone) i w sytuacji B (gdy wentylacja ogólna i miejscowa były włączone) przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5-7.

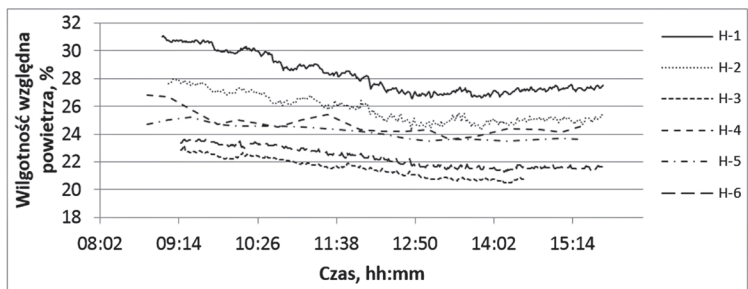


A

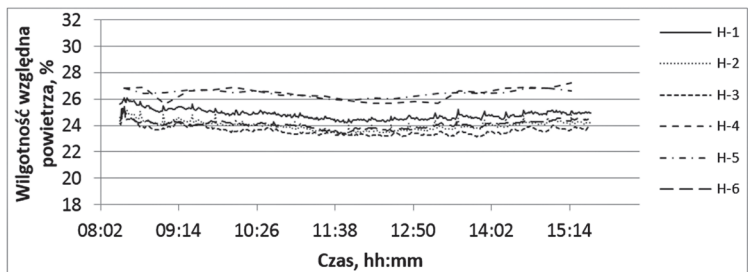


B

Rys. 5. Temperatura powietrza określona w sześciu punktach pomiarowych, w których umieszczono przenośne mierniki DiscMini: sytuacja A – wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) wyłączone, sytuacja B – wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) włączone

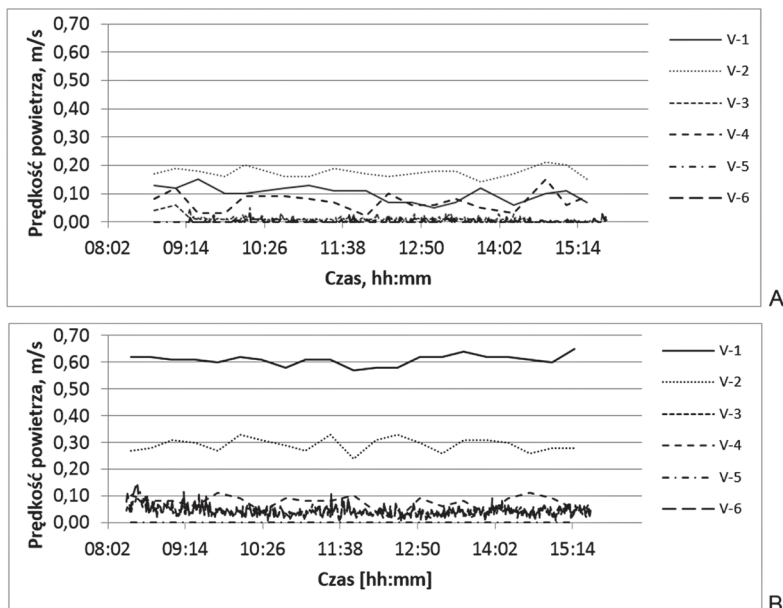


A



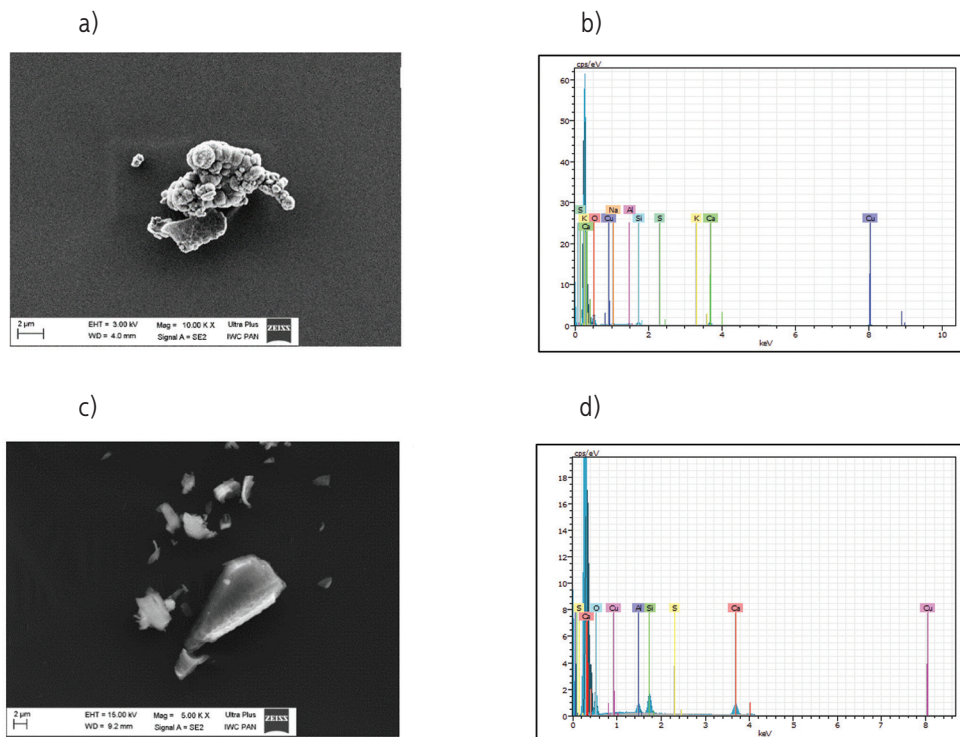
B

Rys. 6. Wilgotność względna powietrza określona w sześciu punktach pomiarowych, w których umieszczono przenośne mierniki DiscMini: sytuacja A – wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) wyłączone, sytuacja B – wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) włączone



Rys. 7. Prędkość powietrza określona w sześciu punktach pomiarowych, w których umieszczono przenośne mierniki DiscMini: sytuacja A – wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) wyłączona, sytuacja B – wentylacja ogólna i miejscowa (dygestorium) włączone

Na rysunku 8 pokazano zdjęcia mikroskopowe i skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza w pobliżu miejsca generowania dymu w sytuacjach A i B, z użyciem NAS (patrz rys. 4), i analizowanych za pomocą mikroskopu elektronowego SEM z detektorem EDS.



Rys. 8. Zdjęcia mikroskopowe (a, c) oraz skład chemiczny (b, d) cząstek pobranych z powietrza podczas generowania dymu:
 – sytuacja A (wentylacja ogólna i miejscowa wyłączona): a) zdjęcie o powiększeniu 10.00KX, b) skład chemiczny: S, K, Ca, O, Cu, Na, Al, Si
 – sytuacja B (wentylacja ogólna i miejscowa włączona): c) zdjęcie o powiększeniu 5.00KX, d) skład chemiczny: S, Ca, O, Cu, Al, Si

Wyniki badań wskazują, że:

- ♦ w przypadku wyłączonej wentylacji ogólnej i miejscowej w pomieszczeniu była wentylacja zrównoważona, natomiast w przypadku włączonej wentylacji ogólnej i miejscowej wentylacja podciśnieniowa
- ♦ procesy generowania dymu wpłynęły na zwiększenie stężeń liczbowych cząstek, ich stężeń powierzchniowych i średnich wymiarów
- ♦ wskaźniki wzrostu stężeń liczbowych w wyniku generowania dymu zawierały się w zakresie 8,33 – 13,54 w sytuacji A (przy wyłączonej wentylacji ogólnej i miejscowej) i w zakresie 3,20 – 66,11 w sytuacji B (przy włączonej wentylacji ogólnej i miejscowej); w sytuacji B zaobserwowano wzrosty

wskaźników stężeń w punktach zlokalizowanych najbliżej miejsca generowania dymu (DiscMini3 i DiscMini6) w porównaniu z sytuacją A, podczas gdy w pozostałych punktach pomiarowych (DiscMini1, DiscMini2, DiscMini4 i DiscMini5) wskaźniki stężeń w sytuacji B były mniejsze niż w sytuacji A

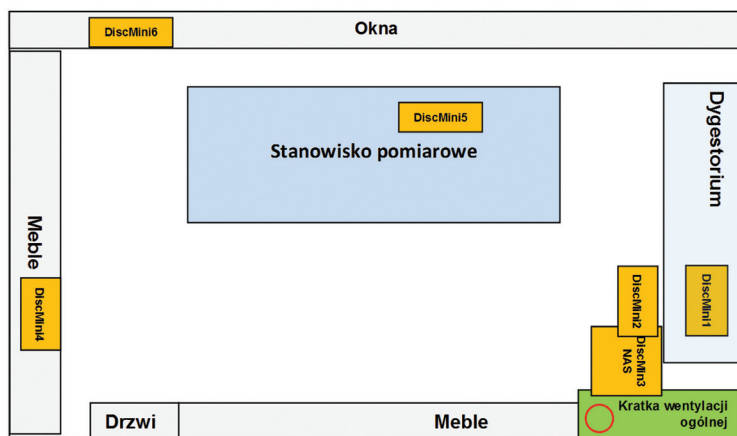
- ✦ wskaźniki wzrostu stężeń powierzchniowych w wyniku generowania dymu zawierały się w zakresie 18,06 – 24,29 w sytuacji A (przy wyłączonej wentylacji ogólnej i miejscowej) i w zakresie 8,55 – 191,90 w sytuacji B (przy włączonej wentylacji ogólnej i miejscowej); w sytuacji B zaobserwowano wzrosty wskaźników stężeń w punktach zlokalizowanych najbliżej miejsca generowania dymu (DiscMini3 i DiscMini6) w porównaniu z sytuacją A, podczas gdy w pozostałych punktach pomiarowych (DiscMini1, DiscMini2, DiscMini4 i DiscMini5) wskaźniki stężeń w sytuacji B były mniejsze niż w sytuacji A
- ✦ wskaźniki wzrostu średnich wymiarów cząstek w wyniku generowania dymu zawierały się w zakresie 2,25 – 2,36 w sytuacji A (przy wyłączonej wentylacji ogólnej i miejscowej) i w zakresie 2,21 – 4,00 w sytuacji B (przy włączonej wentylacji ogólnej i miejscowej)
- ✦ parametry powietrza określane w sześciu punktach pomiarowych w pomieszczeniu różniły się znacznie, gdy dygestorium było wyłączone, i osiągały wartości do siebie zbliżone po włączeniu dygestorium
- ✦ w sytuacji A (wentylacja ogólna i miejscowa wyłączona) największe wartości prędkości odnotowano w pobliżu dygestorium (punkt pomiarowy 2, patrz rys. 4) i następnie w dygestorium (punkt pomiarowy 1), natomiast w sytuacji B (wentylacja ogólna i miejscowa włączone) w dygestorium (punkt 1) i w jego pobliżu (punkt 2)
- ✦ podczas generowania dymu w pomieszczeniu występowały cząstki typowe dla powietrza atmosferycznego.

5.4. Strategia badania rozprzestrzeniania się NOAA pochodzących ze źródeł naturalnych – napływ cząstek z powietrza atmosferycznego do pomieszczenia

W pomieszczeniu wyposażonym w wentylację mechaniczną ogólną (instalację z całkowicie otwartą przepustnicą z kratką wentylacyjną), wentylację mechaniczną miejscową (dygestorium) i wentylację naturalną (w wyniku

otwierania okien i/lub drzwi) kierunek i ruch powietrza – przy zamkniętych oknach i drzwiach – był zdeterminowany przede wszystkim przez włączenie lub wyłączenie dygestorium. Gdy dygestorium było wyłączone, powietrze napływało do pomieszczenia przez instalację wentylacji miejscowej i wypływało przez kratkę wentylacji ogólnej. Gdy dygestorium włączano, powietrze było odciągane z pomieszczenia za pomocą instalacji wentylacji miejscowej i nawiewane do pomieszczenia przez kratkę wentylacji ogólnej. Instalację wentylacji miejscowej wyposażono w dwustopniowy system filtrów powietrza, klasy F7 i klasy H14, natomiast instalacja wentylacji ogólnej nie była wyposażona w żaden filtr powietrza.

Podczas badań określono wpływ włączenia/wyłączenia wentylacji na wartość stężenia cząstek w pomieszczeniu w następujących sytuacjach (okna i drzwi zamknięte): I – wentylacja ogólna i miejscowa wyłączona, II – wentylacja ogólna włączona i wentylacja miejscowa wyłączona, III – wentylacja ogólna wyłączona i wentylacja miejscowa włączona, IV – wentylacja ogólna i miejscowa włączone. Sposób umiejscowienia przyrządów pomiarowych stosowanych podczas badań przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Rozmieszczenie punktów pomiarowych podczas badania rozprzestrzeniania się cząstek w powietrzu pomieszczenia w wyniku włączenia dygestorium i napływu cząstek z powietrza atmosferycznego; czerwone kółko oznacza miejsce napływu cząstek do pomieszczenia z powietrza atmosferycznego

Wartości strumieni objętości powietrza nawiewanego do pomieszczenia i z niego wywiewanego wynosiły odpowiednio:

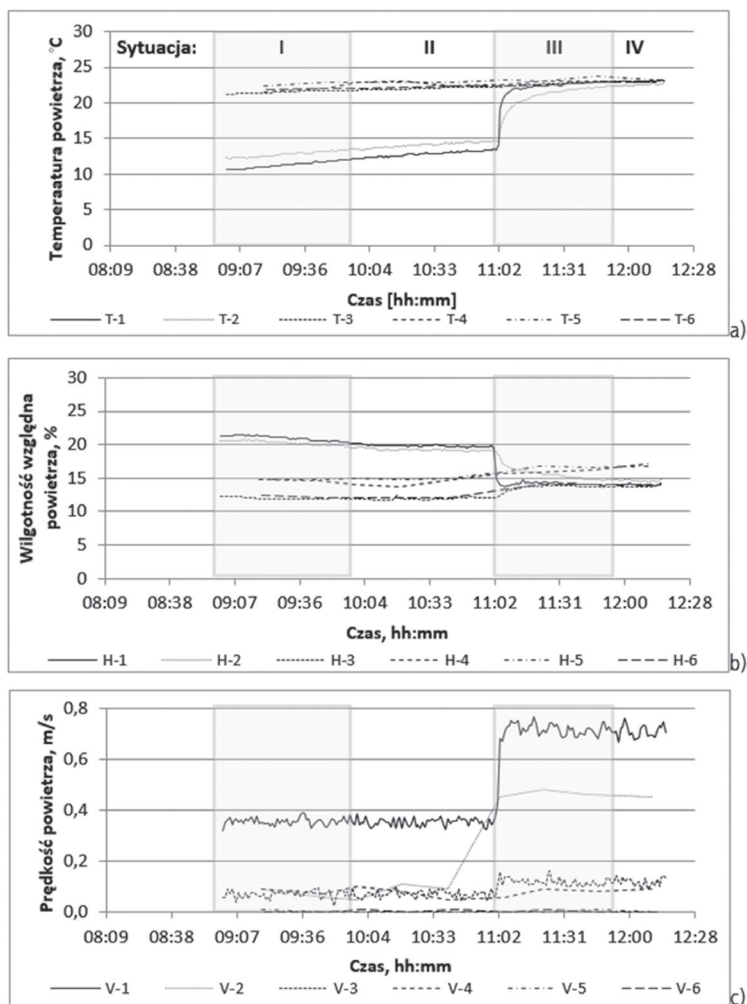
- 114 m³/h i 89 m³/h – w sytuacji I oraz 103 m³/h i 104 m³/h – w sytuacji II, czyli w obu sytuacjach była wentylacja zrównoważona
- 336 m³/h i 917 m³/h – w sytuacji III oraz 319 m³/h i 914 m³/h – w sytuacji IV, czyli w obu sytuacjach była wentylacja podciśnieniowa.

W tabeli 3 podano wyniki obliczeń wskaźników zmienności (wzrostu) stężeń liczbowych cząstek, ich stężeń powierzchniowych i średnich wymiarów określonych z użyciem przyrządów DiscMini, w sześciu punktach pomiarowych zlokalizowanych w badanym pomieszczeniu, w wyniku włączenia dygestorium i napływu do pomieszczenia cząstek z powietrza atmosferycznego. Zatem sytuację III (wentylacja ogólna wyłączona i wentylacja miejscowa włączona) odniesiono do sytuacji I (wentylacja ogólna i miejscowa wyłączone), natomiast sytuację IV (wentylacja ogólna i wentylacja miejscowa włączona) odniesiono do sytuacji II (wentylacja ogólna włączona i wentylacja miejscowa wyłączona).

Tabela 3. Wyniki obliczeń wskaźników zmienności (wzrostu) stężeń liczbowych, stężeń powierzchniowych i średnich wymiarów cząstek w wyniku włączenia dygestorium i napływu do pomieszczenia cząstek z powietrza atmosferycznego

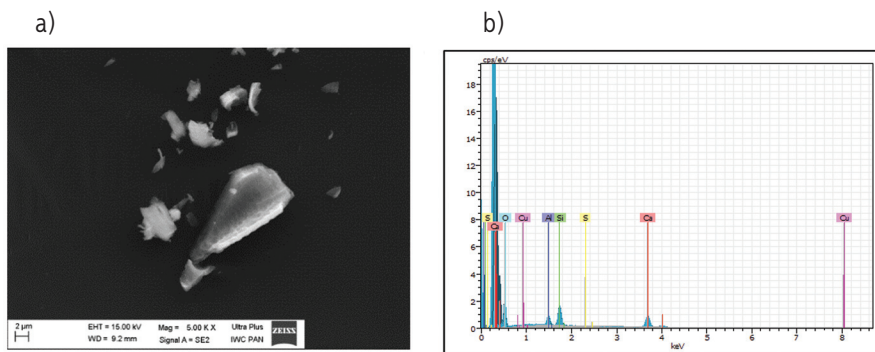
Przyrząd pomiarowy	Wskaźniki zmienności stężenia liczbowego cząstek		Wskaźniki zmienności stężenia powierzchniowego cząstek		Wskaźniki zmienności średniego wymiaru cząstek	
	sytuacja III / I	sytuacja IV / II	sytuacja III / I	sytuacja IV / II	sytuacja III / I	sytuacja IV / II
DiscMini1 (10–700 nm)	3,57	5,50	4,49	6,30	1,25	1,14
DiscMini2 (10–700 nm)	2,12	3,27	2,61	3,74	1,21	1,13
DiscMini3 (10–700 nm)	1,10	1,70	1,41	2,01	1,27	1,18
DiscMini4 (10–700 nm)	1,18	1,87	1,48	2,16	1,24	1,15
DiscMini5 (10–700 nm)	1,08	1,67	1,33	1,94	1,22	1,15
DiscMini6 (10–700 nm)	1,14	1,76	1,40	2,05	1,22	1,16

Na rysunku 10 przedstawiono wykresy zmienności parametrów powietrza (temperatury, wilgotności względnej i prędkości) podczas wszystkich badanych sytuacji, tzn. I – wentylacja ogólna i miejscowa wyłączona, II – wentylacja ogólna włączona i wentylacja miejscowa wyłączona, III – wentylacja ogólna wyłączona i wentylacja miejscowa włączona, IV – wentylacja ogólna i miejscowa włączona.



Rys. 10. Parametry powietrza określone w sześciu punktach pomiarowych, w których umieszczono przenośne mierniki DiscMini: sytuacja I – wentylacja ogólna i miejscowa wyłączona, sytuacja II – wentylacja ogólna włączona i wentylacja miejscowa wyłączona, sytuacja III – wentylacja ogólna wyłączona i wentylacja miejscowa włączona, sytuacja IV – wentylacja ogólna i miejscowa włączona: a) temperatura, b) wilgotność względna, c) prędkość powietrza

Na rysunku 11 przedstawiono zdjęcie mikroskopowe i skład chemiczny cząstek pobranych z powietrza w pobliżu miejsca napływu powietrza atmosferycznego (patrz rys. 9).



Rys. 11. Zdjęcie mikroskopowe o powiększeniu 5.00KX (a); skład chemiczny cząstek (S, N, C, O, Ca, Cl, K, Cu, Na, Mg, Al, Si) pobranych podczas napływu powietrza atmosferycznego (b)

Wyniki badań wskazują, że:

- ♦ gdy wentylacja miejscowa (dygestorium) była wyłączona, niezależnie od tego, czy wentylacja ogólna była wyłączona, czy włączona, w pomieszczeniu występowała wentylacja zrównoważona
- ♦ gdy wentylacja miejscowa (dygestorium) była włączona, niezależnie od tego, czy wentylacja ogólna była wyłączona, czy włączona, w pomieszczeniu występowała wentylacja podciśnieniowa
- ♦ wskaźniki wzrostu stężeń cząstek w wyniku włączenia dygestorium i napływu do pomieszczenia cząstek z powietrza atmosferycznego mieściły się w zakresie 1,08 – 5,50 dla stężenia liczbowego, a dla stężenia powierzchniowego w zakresie 1,33 – 6,30
- ♦ wskaźniki wzrostu średnich wymiarów cząstek w wyniku włączenia dygestorium i napływu do pomieszczenia cząstek z powietrza atmosferycznego mieściły się w zakresie 1,13 – 1,27
- ♦ 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

- ✦ największe prędkości powietrza odnotowano wewnątrz dygestorium (punkt pomiarowy 1, patrz rys. 9) i w pomieszczeniu w pobliżu dygestorium (punkt pomiarowy 2), gdy dygestorium było włączone
- ✦ w powietrzu występowały cząstki typowe dla powietrza atmosferycznego.

6. 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, s. 1-9.
2. Mierzwiński S.: *Aerodynamika wentylacji ogólnej*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2007.
3. 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.
4. PN-EN 12599:2013-04 *Wentylacja budynków – Procedury badań i metody pomiarowe dotyczące odbioru wykonanych instalacji wentylacji i klimatyzacji*.



