

A set of five horizontal, slightly wavy lines in a light brown color, positioned above the title area.

Tomasz Jankowski

**OCENA STOSOWANIA
INSTALACJI WENTYLACJI
PODCZAS OBRÓBK
NANOMATERIAŁÓW**

ZALECENIA

A large, dark, textured area at the bottom of the page, possibly representing a microscopic view of nanoparticles or a similar material, with a brownish-orange gradient overlay.

Tomasz Jankowski

Ocena stosowania instalacji wentylacji podczas obróbki nanomateriałów

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.

Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autor

Tomasz Jankowski

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt okładki

Anna Antoniszewska

Opracowanie redakcyjne

Lucyna Wyciszkievicz-Pardej

Opracowanie graficzne

Anna Borkowska

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

ISBN 978-83-7373-211-7



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

Wprowadzenie	5
Metoda oceny	7
Przygotowanie i kontrola charakterystyki przepływowej w komorze testowej	8
Pomiar prędkości przepływu powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu źródła emisji zanieczyszczenia powietrza	9
Określanie stężenia zanieczyszczenia powietrza i znacznika gazowego w otoczeniu obiektu badań	14
Przykładowa ocena działania instalacji wentylacji i rozdziału powietrza wentylacyjnego w procesach obróbki mechanicznej systemu pianek elastycznych formowanych	21
Materiał badawczy	21
Metodyka badań	22
Omówienie wyników oceny	23
Podsumowanie	27
Bibliografia	27

Wprowadzenie

Na świecie zaobserwowano wzrost różnych zastosowań nanomateriałów w życiu człowieka [1]. Z badań GUS dotyczących działalności nanotechnologicznej w Polsce w 2014 r. wynika, że funkcjonuje 66 przedsiębiorstw, które wykazały działalność nanotechnologiczną, a działalność badawczą i rozwojową w dziedzinie nanotechnologii prowadziły 147 podmioty (z tego 48 przedsiębiorstw) [2]. Wielkość nakładów wewnętrznych poniesionych na działalność nanotechnologiczną w 2014 r. szacuje się na 471,7 mln zł. Jak wynika z informacji GUS, wartość wyrobów produkowanych przez przedsiębiorstwa to 4304,3 mln zł. Właściwości nanomateriałów są bardzo pożądane z punktu widzenia inżynierii materiałowej, dlatego coraz chętniej się je stosuje w wielu różnych produktach codziennego użytku [3].

Obok wielu korzyści, które wynikają z zastosowania nanotechnologii, nie można zapominać o zagrożeniach pojawiających się przy działaniach w skali nano [4, 5]. Narażeni mogą być pracownicy sektora badań i rozwoju nanotechnologii oraz wielu gałęzi przemysłu. W 2014 r. w działalności badawczo-rozwojowej w dziedzinie nanotechnologii zaangażowanych było 3007 osób, w tym 265 osób w przedsiębiorstwach [2]. Wchłanianie nanoobjektów drogą oddechową może powodować poważne ryzyko dla zdrowia pracowników. Zatrudnieni w przedsiębiorstwach wykorzystujących nanotechnologie są grupą osób szczególnie zagrożonych, ponieważ poziomy narażenia są zazwyczaj wyższe w miejscach pracy niż podczas dalszego przetwarzania i użytkowania nanomateriałów w życiu codziennym [6]. **Według raportu Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy nanomateriały są jednym z głównych i nowych zagrożeń dla zdrowia pracowników [7].** Nanoobjekty mogą przedostawać się do organizmu człowieka drogą oddechową, pokarmową oraz przez skórę. Największe jednak zagrożenie stanowi ekspozycja inhalacyjna, ponieważ nanocząstki mają zdolność przenikania przez komórki nabłonkowe dróg oddechowych oraz mogą być także transportowane do mózgu [8, 9].

Z uwagi na to, że wiele rozwiązań i produktów z zastosowaniem nanomateriałów jest nowych, wiedza na temat bezpieczeństwa wytwarzania i stosowania

sztucznych nanomateriałów NMN (ang. *manufactured nanomaterials*) nadal jest niepełna. Nanomateriały zazwyczaj są stosowane ze względu na swoją wysoką reaktywność, mogą więc mieć poważniejsze działania niepożądane niż materiały złożone z cząstek o wymiarach mikrometrycznych. Mała średnica nanoobjektów sprawia, że charakteryzują się one dużą powierzchnią przy małej objętości. Większa jest także zdolność substancji do adsorbowania innych cząsteczek na powierzchni [10]. W związku z tym istnieje zapotrzebowanie na rozwój metod organizacyjnych i środków technicznych stosowanych do ochrony zdrowia człowieka przed zagrożeniem emisją nanoobjektów, w szczególności podczas obróbki nanomateriałów [11]. W pomieszczeniach, w których występują nanoobjekty, powinny być zastosowane rozwiązania techniczne uniemożliwiające przedostanie się tych czynników do innych pomieszczeń oraz zainstalowana i sprawnie działająca miejscowa wentylacja mechaniczna, gwarantująca wymianę powietrza niezbędną do wyeliminowania lub ograniczenia narażenia na te czynniki.

Skuteczność działania instalacji wentylacji miejscowej LEV (ang. *local exhaust ventilation*) można przedstawiać w kategoriach jakościowych i ilościowych jako zdolność do zatrzymywania i usuwania jednej lub wielu substancji zanieczyszczających uwalnianych ze źródła znajdującego się wewnątrz przestrzeni roboczej oraz zdolność do minimalizowania ewentualnych zakłóceń spowodowanych przeciągami, ruchami obsługującego czy poruszaniem się personelu w otoczeniu źródła emisji. Szczególnie istotne są badania instalacji wentylacji miejscowej w warunkach ich użytkowania, gdyż parametry pracy obudowy czy odciągu miejscowego są ściśle uzależnione od parametrów emisji nanoobjektów w danym pomieszczeniu. Wiele badań skupia się przede wszystkim na ocenie szkodliwego działania nanoobjektów na człowieka w procesach obróbki nanomateriałów [12, 13] oraz oddziaływania nanocząstek z surfaktantem płucnym [14].

Obecnie, z uwagi na coraz większą produkcję nanomateriałów w różnych dziedzinach przemysłu, badania powinny obejmować przede wszystkim kształtowanie rozdziału powietrza wentylacyjnego w celu wspomaganie zmniejszenia zagrożenia nanoobjektami. Zmiana podejścia do ochrony przed narażeniem na cząstki o nanowymiarach powinna być związana z modelowaniem rozdziału powietrza przez wentylację miejscową stosowaną bezpośrednio przy źródle emisji nanoobjektów wspomaganą przez wentylację ogólną w pomieszczeniu.

Z tego względu istotna jest ocena właściwości eksploatacyjnych instalacji wentylacji miejscowej i wpływu rozdziału powietrza wentylacyjnego w przepływie zanieczyszczeń w otoczeniu źródła emisji na stanowiskach pracy przy obróbce nanomateriałów, ze szczególnym uwzględnieniem procesów transportu masy, ciepła i pędu, tzn. dyfuzji molekularnej, turbulentnej, unoszenia zanieczyszczeń w polu prędkości powietrza czy oddziaływania zewnętrznego pola sił elektrostatycznych.

Parametry charakteryzujące ocenę działania instalacji wentylacji i rozdziału powietrza wentylacyjnego w otoczeniu źródła emisji związanego z obróbką nanomateriałów określa się metodą anemometryczną (określenie strumienia objętości powietrza w przewodzie wywiewnym i prędkości powietrza w powierzchni roboczej) oraz metodą znaczników gazowych (pomiar stężenia masowego gazu i wydajność wymiany powietrza wentylacji) [15, 16].

Metoda oceny

Ocena działania instalacji wentylacji miejscowej i rozdziału powietrza wentylacyjnego w otoczeniu źródła emisji związanego z obróbką nanomateriałów jest wykonywana na stanowisku badawczym wyposażonym w trzy moduły pomiarowe.

Pierwszy moduł obejmuje układ przygotowania i kontrolowania charakterystyki przepływowej w komorze testowej oraz przyrządy do określania parametrów powietrza w otoczeniu komory testowej.

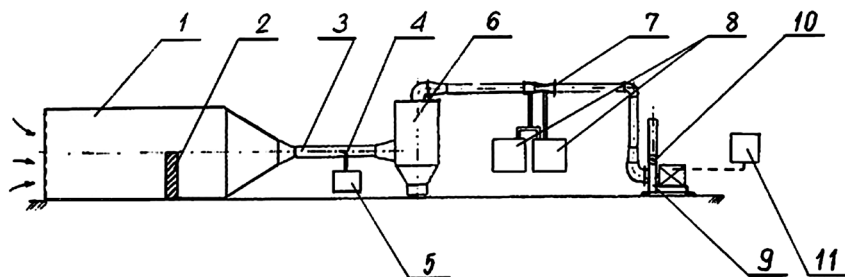
Zmiany prędkości przepływu powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu i przestrzeni roboczej obiektu badań są określane w drugim module pomiarowym z wykorzystaniem zestawu do generowania i rejestracji obrazów przepływu i wielopunktowego zestawu pomiarowego.

Trzeci moduł umożliwia dozowanie znacznika gazowego w miejscu emisji oraz pomiar stężenia zanieczyszczenia powietrza i znacznika gazowego w punktach pomiarowych zlokalizowanych w otoczeniu źródła emisji.

Przygotowanie i kontrola charakterystyki przepływowej w komorze testowej

Schemat modułu przygotowania i kontroli przepływu przedstawiono na rysunku 1.

Badane źródło emisji zanieczyszczeń powietrza wraz z instalacją miejscowej wentylacji o określonych parametrach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych jest umieszczane wewnątrz komory testowej, której konstrukcja zapewnia określony rozkład prędkości przepływu powietrza w otoczeniu obiektu badań.



Rys. 1. Schemat modułu przygotowania i kontrolowania charakterystyki przepływowej, gdzie:

- 1 – komora
- 2 – obiekt badań (maszyna z instalacją wentylacji miejscowej)
- 3 – przewód pomiarowy
- 4 – sonda do pobierania próbek powietrza
- 5 – analizator zanieczyszczenia powietrza
- 6 – urządzenie filtrowentylacyjne
- 7 – zwężka pomiarowa
- 8 – cyfrowy mikromanometr różnicowy
- 9 – wentylator
- 10 – przepustnica regulacyjna
- 11 – szafa sterownicza.

Przepływ powietrza przez komorę testową jest wymuszany przez wentylator promieniowy. Powietrze jest pobierane z pomieszczenia laboratoryjnego, w którym znajduje się komora testowa. Następnie powietrze wraz z zanieczyszczeniami emitowanymi z maszyny jest zasysane przez przewód wentylacyjny, poprzez urządzenie filtrowentylacyjne, zwężkę pomiarową i filtr wysokoskuteczny na zewnątrz pomieszczenia.

Strumień objętości powietrza w układzie pomiarowym jest regulowany za pomocą przepustnicy regulacyjnej, a jego wartość jest określana poprzez pomiar różnicy ciśnień na zwężce pomiarowej z użyciem cyfrowego mikromanometru różnicowego.

W trakcie prowadzenia badań są mierzone parametry powietrza w otoczeniu komory testowej z użyciem termohigrobarometru.

Pomiar prędkości przepływu powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu źródła emisji zanieczyszczenia powietrza

W ramach oceny aerodynamicznych właściwości przepływów powietrza w otoczeniu źródła emisji związanego z obróbką nanomateriałów są przeprowadzane pomiary prędkości przepływu powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu obiektu badań w komorze testowej z wykorzystaniem zestawu składającego się z następujących elementów (patrz rys. 2):

- ▶ wielopunktowego zestawu pomiarowego TESTO, umożliwiającego pomiar prędkości przepływu powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu obiektu badań
- ▶ anemometra VelociCalc do pomiaru prędkości przepływu powietrza w przewodzie systemu wychwytywania
- ▶ elektronicznego mikromanometra różnicowego do określania spadku ciśnienia w przewodzie wywiewnym
- ▶ konstrukcji nośnej dla sond pomiaru parametrów powietrza
- ▶ generatorów do wizualizacji przepływu powietrza.



Rys. 2. Widok ogólny modułu do pomiaru prędkości przepływu powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu źródła emisji w komorze

Wielopunktowy zestaw pomiarowy TESTO

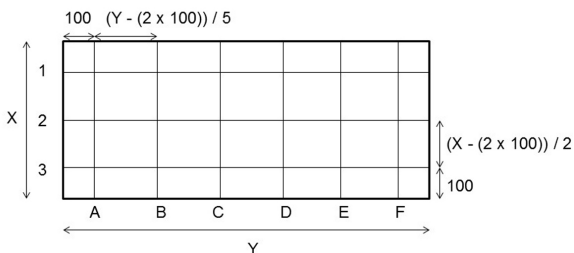


Rys. 3. Widok ogólny zestawu pomiarowego Testo

Wielopunktowy zestaw pomiarowy TESTO wraz z sondami 3-funkcyjnymi (Testo AG, Niemcy) (rys. 3) umożliwia pomiar prędkości powietrza, temperatury i wilgotności względnej powietrza jednocześnie w 9 punktach.

Anemometr powinien być typu jednokierunkowego o czułości kierunkowej $\pm 20^\circ$. Stała czasowa anemometru powinna być mniejsza niż 0,5 s. Niepewność indywidualnego pomiaru nie powinna być większa niż $0,02 \text{ m/s} + 5\%$ odczytu w zakresie od 0,2 do 1,0 m/s. Ponadto stosuje się urządzenie rejestrujące dane wyjściowe z anemometru w celu późniejszego ich analizowania.

Sondę anemometru należy usytuować na wewnętrznej płaszczyźnie pomiaru w punktach utworzonych na przecięciu się następujących linii (rys. 4):



Rys. 4. Sposób rozmieszczenia punktów pomiarowych prędkości powietrza w powierzchni czołowej systemu wychwytywania

- Serii co najmniej trzech linii równo oddalonych od siebie między bocznymi granicami wewnętrznej płaszczyzny pomiaru, z których dwie linie zewnętrzne są w odległości (100 ± 5) mm od granic bocznych. Linie w środku powinny znajdować się w odległości 400 mm lub mniejszej od linii zewnętrznych i od siebie.

- Serii co najmniej trzech linii równo oddalonych od siebie między poziomymi granicami wewnętrznej płaszczyzny pomiaru, z których dwie linie zewnętrzne są w odległości (100 ± 5) mm od granic poziomych. Linie w środku powinny znajdować się w odległości 400 mm lub mniejszej od linii zewnętrznych i od siebie.

Pomiary należy wykonać za pomocą sondy anemometru usytuowanej w każdym z punktów siatki pomiarowej. Czujnik należy ustawić tak, aby kierunek pomiaru był prostopadły do wewnętrznej płaszczyzny pomiaru. Należy zmniejszyć do minimum zakłócenia w przestrzeni przeciwprądu czujnika. Powinno się mierzyć i rejestrować poszczególne składowe prędkości V_i [m/s] prostopadle do wewnętrznej płaszczyzny pomiaru w regularnych odstępach co 1,0 sekundę lub częściej co najmniej przez 60 sekund.

Należy określić średnią prędkość przestrzenną V_{sr} [m/s], czyli średnią arytmetyczną średnich prędkości miejscowych dla powierzchni czołowej systemu wychwytywania. Następnie dla każdego punktu pomiarowego trzeba obliczyć wartość intensywności turbulencji prędkości powietrza T_u [%]. Intensywność turbulencji jest stosunkiem standardowego odchylenia prędkości powietrza do średniej prędkości powietrza w rozpatrywanej przestrzeni. Im lepszy i bardziej równomierny system rozdziału powietrza tym mniejsza intensywność turbulencji.

W celu określenia wpływu źródła ciepła (proces obróbki nanomateriałów) na powstawanie konwekcyjnych przepływów powietrza w otoczeniu i przestrzeni roboczej źródła emisji zanieczyszczenia powietrza ustala się rozkład temperatury powietrza T [°C] i wilgotności względnej powietrza RH [%] w każdym punkcie pomiarowym lokalnych prędkości przepływu powietrza.

Anemometr do pomiaru prędkości powietrza w przewodzie wentylacyjnym

Do pomiarów prędkości przepływu powietrza w przewodzie systemu wychwytywania są stosowane anemometry VelociCalc Model 8360 (TSI Inc., USA). Na rysunku 5 przedstawiono widok ogólny anemometru VelociCalc.



Rys. 5. Widok ogólny anemometru VelociCalc

Przekrój pomiarowy powinien znajdować się na prostym odcinku przewodu, w odległości względnej wynikającej ze stosunku odległości między przekrojem pomiarowym a miejscem występowania najbliższego zakłócenia przepływu oraz średnicy hydraulicznej przewodu w płaszczyźnie pomiarowej.

Wymaganą liczbę punktów pomiarowych prędkości powietrza w przewodzie określa się na podstawie oczekiwanej całkowitej niepewności pomiaru strumienia objętości powietrza obejmującej błąd przyrządu pomiarowego w funkcji odległości względnej.

Strumień objętości powietrza w przewodach o przekroju poprzecznym prostokątnym określa się metodą standardową. Metoda ta polega na pomiarze prędkości powietrza w punktach pomiarowych rozmieszczonych w siatce pomiarowej przekroju poprzecznego.

Strumień objętości powietrza w przewodach o przekroju poprzecznym kołowym określa się metodą linii środków ciężkości. Metoda ta polega na pomiarze prędkości powietrza w punktach pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż co najmniej dwóch prostopadłych do siebie średnic. Punkty pomiarowe wybiera się w taki sposób, że:

- ▶ pomiar prędkości powietrza odpowiada pierścieniowi o równym polu powierzchni
- ▶ jeśli rozkład prędkości jest liniowy, to prędkość reprezentatywna nie leży na linii środkowej, lecz na linii środków ciężkości pierścienia.

Wynik pomiarów wyznacza się, obliczając średnią arytmetyczną poszczególnych pomiarów prędkości w liniach środków ciężkości. Strumień objętości powietrza określa się na podstawie średniej prędkości powietrza w przewodzie, określanej jako wartość średnia arytmetyczna z wyników pomiarów prędkości powietrza w wybranych punktach przekroju pomiarowego przewodu wywiewnego.

Mikromanometr różnicowy do pomiaru spadku ciśnienia w przewodzie wywiewnym

Do określania spadku ciśnienia w przewodzie wentylacyjnym może być stosowany dowolny elektroniczny mikromanometr różnicowy. W miejscu podłączenia do instalacji wywiewnej należy umieścić co najmniej cztery zawory do pomiaru ciśnienia równomiernie rozmieszczone na obwodzie łączącego przewodu

wentylacyjnego. Następnie trzeba wszystkie zawory do pomiaru średniego ciśnienia połączyć ze sobą, aby uzyskać jeden wspólny wylot do pomiaru ciśnienia przeciętnego porównywanego z ciśnieniem powietrza w pomieszczeniu.

Potem należy poczekać do czasu ustabilizowania przepływu i mierzyć co najmniej przez 60 sekund średni spadek ciśnienia dla danego ustawienia okna przesuwanego wyciągu. Jeżeli wyciąg ma wbudowany zawór do pomiaru ciśnienia, należy je mierzyć także w tym miejscu. Jako wynik badania należy podać wartość spadku ciśnienia Δp [Pa] i wielkość pola przekroju poprzecznego przewodu wywiewnego, w którym mierzono spadek ciśnienia.

Konstrukcja nośna dla sond pomiaru parametrów powietrza

Konstrukcja nośna umożliwia wielopunktowy pomiar prędkości przepływu, temperatury i wilgotności względnej powietrza w otoczeniu źródła emisji zanieczyszczeń. Układ składa się z zestawu 9 sond wraz z uchwytem i konstrukcją wsporczą rozmieszczonymi na siatce pomiarowej umożliwiającej:

- ▶ rozmieszczenie sond na przecięciu następujących linii:
 - trzech równo oddalonych o 100 ± 5 mm od siebie linii pionowych
 - trzech równo oddalonych o 100 ± 5 mm od siebie linii poziomych
- ▶ umieszczenie sond i całego zestawu 9 sond z płynną regulacją kąta nachylenia:
 - w zakresie od -45° do $+45^\circ$ w płaszczyźnie poziomej i pionowej
 - obrót 360° w płaszczyźnie lewo – prawo.

Generatory do wizualizacji przepływu powietrza

Do wizualizacji przepływu powietrza mogą być stosowane generatory dymu: rurki zadymiające, *Accu Flow Check* (Drägerwerk AG & Co. KGaA, Niemcy) lub ANTARI Z-1000. Na rysunku 6 przedstawiono widok ogólny stosowanych generatorów dymu. Metoda wizualizacji przepływu powietrza polega na znacznikowaniu ruchu powietrza oraz rejestracji obrazów i filmowania przepływów aparatem cyfrowym.



Rys. 6. Widok ogólny generatorów dymu

Celem wizualizacji przepływu powietrza jako części badania jest uzyskanie informacji o przepływie powietrza w pomieszczeniu i wzajemnym oddziaływaniu na siebie przepływu powietrza w systemie wychwytywania i w pomieszczeniu. Na podstawie wyników badania można zdecydować czy potrzebne są takie dalsze badania, jak badanie prędkości przepływu powietrza i stężenia zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniu.

Zaleca się wizualizację przepływu powietrza wokół zainstalowanego systemu wychwytywania i w płaszczyźnie otworu ssącego, aby sprawdzić, czy nie ma zakłóceń wywołanych np. powietrzem dopływającym do pomieszczenia, które mogłoby wpłynąć na skuteczność działania wyciągu. Wizualizację należy wykonać, generując dym w odległości około 400 mm przed systemem wychwytywania, uchodzący w górę w kierunku sufitu komory. Gęstość dymu powinna być zbliżona do gęstości powietrza w pomieszczeniu. Dym powinien być wypuszczany w małych dawkach i z prędkością nie większą niż 0,2 m/s.

Ruch powietrza wokół otworu roboczego należy zobrazować, a wszelkie zakłócenia odnotować w sprawozdaniu z badania.

Określanie stężenia zanieczyszczenia powietrza i znacznika gazowego w otoczeniu obiektu badań

W skład trzeciego modułu pomiarowego wchodzi dwa systemy pomiarowe:

- ▶ system dozowania znacznika gazowego w miejscu emisji rzeczywistych zanieczyszczeń składający się z:
 - butli ze znacznikiem gazowym wraz z reduktorem dwustopniowym
 - zestawu trzech przepływomierzy umożliwiających pomiar strumienia objętości znacznika gazowego emitowanego w źródle rzeczywistych zanieczyszczeń w zakresie od 1 ml/min do 500 l/min
 - zestawu sond do emitowania znacznika gazowego w miejscu emisji rzeczywistych zanieczyszczeń
- ▶ system pobierania próbek zanieczyszczenia powietrza i znacznika gazowego.

System dozowania znacznika gazowego

Znacznik gazowy powinien być podawany w miejscu emisji zanieczyszczenia powietrza za pomocą zespołu wtryskiwaczy symulujących różny kształt źródeł emisji. Parametry aerodynamiczne sond dobrano pod kątem zgodności z parametrami aerodynamicznymi źródeł emisji zanieczyszczeń. W ramach badań stosowane będą trzy typy źródeł emisji:

- ▶ źródła punktowe, które były symulowane z użyciem otwartych rur wytwarzających strumienie o zmiennych charakterystykach aerodynamicznych
- ▶ źródła płaszczyznowe, które były symulowane przy użyciu układu przestrzennego zakończonego powierzchnią wylotową wyłożoną siatką perforowaną
- ▶ źródła objętościowe, które były symulowane przy użyciu układu objętościowego z rozmieszczonymi powierzchniami wylotowymi znacznika gazowego.

System poboru próbek zanieczyszczenia powietrza i znacznika gazowego

W ramach badań zmian stężenia zanieczyszczenia powietrza i znacznika gazowego w punktach pomiarowych zlokalizowanych w otoczeniu źródła emisji pomiar są przeprowadzane z wykorzystaniem zestawu składającego się z następujących elementów:

- ▶ zestawu sond do poboru próbek powietrza, umożliwiającego zasysanie zanieczyszczeń powietrza i znaczników gazowych do danego miernika
- ▶ systemu analizy wymiarowej cząstek (SMPS, Model 3936, TSI, USA) składającego się z analizatora ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA, Model 3080L), dwóch kondensacyjnych liczników cząstek (CPC, Model 3022A i Model 3775) i komputera PC, stosowanego do pomiaru stężenia liczbowego cząstek w zakresie do 10^7 cząstek/cm³ przy niedokładności pomiaru zależnej od stężenia i metody pomiaru
- ▶ przenośnego analizatora znaczników gazowych MIRAN SapphIRe Model 100E (Thermo/Foxboro, USA), mierzącego stężenie masowe heksafluorku siarki w zakresie od 0,006 do 24 mg/m³ z niepewnością pomiaru do 20%.



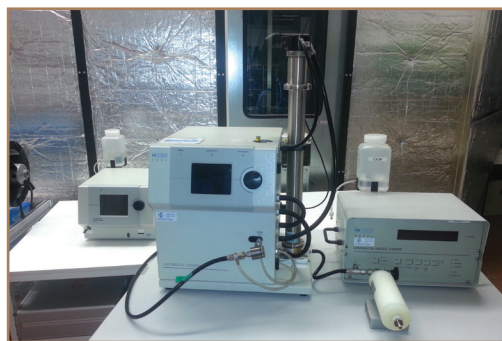
Rys. 7. Widok ogólny zestawu sond do poboru próbek powietrza

Zestaw sond do poboru próbek powietrza

Zestaw składa się ze statywów, uchwytów, elastycznych przewodów z tworzywa poliuretanowego (PU) o wymiarach $\varnothing 7 \times 10$ mm i łączników (rys. 7).

Zestaw sond umożliwia pobór próbek powietrza w sposób izokinetyczny. Dobór sond do pobierania próbek powietrza wynikał z zasady równości prędkości powietrza z aerozolem na wlocie do sondy oraz prędkości powietrza w otoczeniu źródła emisji zanieczyszczenia powietrza. Zapewnia to niezmienność rozkładu wymiarowego cząstek przepływającego zanieczyszczenia powietrza. Innymi słowy, rozkład wymiarowy cząstek nie ulega zmianie od momentu pobrania próbki do czasu jego analizy w liczniku. Na stanowisku badawczym zastosowano komplet sond o wlotowych średnicach wewnętrznych w zakresie od 0,5 do 8,0 mm.

System analizy wymiarowej cząstek aerozoli



System analizy wymiarowej cząstek SMPS Model 3936 umożliwia pomiar rozkładu wymiarowego cząstek z wykorzystaniem metody analizy ruchliwości elektrycznej (rys. 8).

Rys. 8. Widok systemu analizy wymiarowej cząstek

W analizatorze ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA) cząstki są klasyfikowane według ich elektrycznej ruchliwości, która jest zależna od wymiarów cząstek i liczby ładunków elektrycznych zdeponowanych na danej cząstce.

Licznik CPC liczy cząstki w szerokim zakresie stężenia, ponieważ wykorzystuje zarówno metodę zliczania pojedynczych cząstek, jak i metodę fotometryczną. W trybie zliczania pojedynczych cząstek czujnik liczy indywidualne impulsy pochodzące od każdej cząstki przechodzącej przez strefę pomiaru. Korekcja w trybie ciągłym jest wykorzystywana dla oszacowania koincydencji przy zliczaniu pojedynczych cząstek, co umożliwia zmaksymalizowanie dokładności pomiaru. Wyższe stężenia (do 10^7 cząstek/cm³) są mierzone poprzez analizowanie całości strumienia światła rozproszonego przez wszystkie cząstki znajdujące się w strefie pomiaru i porównywanie intensywności światła rozproszonego do poziomów kalibracji. Jest to tzw. tryb fotometryczny.

Kondensacyjny licznik cząstek (CPC 3022A) umożliwia zliczanie cząstek w zakresie od 7 nm do 3 μ m i pomiar stężenia liczbowego cząstek do 10^7 cząstek/cm³ przy niedokładności pomiaru zależnej od stężenia:

- ▶ $\pm 10\%$ dla stężeń do $5 \cdot 10^5$ cząstek/cm³
- ▶ $\pm 20\%$ dla stężeń z zakresu $5 \cdot 10^5$ cząstek/cm³ ÷ 10^7 cząstek/cm³.

Kondensacyjny licznik cząstek (CPC 3775) umożliwia zliczanie cząstek w zakresie od 4 nm do 3 μ m i pomiar stężenia liczbowego cząstek do 10^7 cząstek/cm³ przy niedokładności pomiaru zależnej od stężenia i metody pomiaru:

- ▶ $\pm 10\%$ dla stężeń do $5 \cdot 10^4$ cząstek/cm³ z ciągłą korekcją ze względu na koincydencję
- ▶ $\pm 20\%$ dla stężeń z zakresu $5 \cdot 10^4$ cząstek/cm³ ÷ 10^7 cząstek/cm³, metoda fotometryczna.

Prawidłowe zliczanie cząstek aerozolu przez system analizy wymiarowej SMPS wymaga utrzymania następujących warunków przepływowych przez przyrządy:

- ▶ nadania takiej samej wartości dla strumienia objętości aerozolu w kondensacyjnych licznikach cząstek (CPC) oraz strumienia objętości aerozolu w analizatorze ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA)
- ▶ stabilizacji na poziomie 10:1 proporcji wartości strumieni objętości w analizatorze (LDMA) odpowiednio dla powietrza osłonowego i aerozolu testowego.

Analizator znaczników gazowych



W badaniach z użyciem znaczników gazowych do pomiaru ich stężenia masyowego może być stosowany analizator gazów MIRAN SappHRe Model 100E (Thermo Electron Corporation/Foxboro, USA) (rys. 9).

Rys. 9. Widok ogólny analizatora gazu MIRAN

Przyrząd ma wbudowany jednowiązkowy spektrofotometr na podczerwień. Mikroprocesor automatycznie kontroluje analizę, przetwarza sygnał pomiaru i oblicza absorbancję. Dzięki zastosowanej technologii absorpcji promieniowania podczerwonego w kuwecie o zmiennej długości (0,5 m i 12,5 m) oraz filtrów przeszukujących widmo, analizator umożliwia pomiar stężenia większości związków organicznych i wielu związków nieorganicznych, m.in. heksafluorku siarki, podtlenku azotu, metanu czy ditlenku węgla. Dzięki zastosowaniu długiej kuwety pomiarowej analizator umożliwia wykrywanie większości mierzonych gazów na poziomie ppm, a wiele z nich nawet w zakresie 100 ÷ 200 ppb. W tabeli 1 przedstawiono charakterystyczne parametry pomiarowe analizatora dla znaczników gazowych [17].

Tabela 1. Zestawienie parametrów pomiarowych wybranych znaczników gazowych

Znaczniki gazowe	Symbol	Górna granica zakresu		Dolna granica wykrywalności		Długość fali	Długość kuwety pom.	Niepewność pomiaru
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	μm	m	%
Heksafluorek siarki	SF ₆	4	24	0,001	0,006	10,708	12,5	10 (1 ppm) 20 (4 ppm)
Podtlenek azotu	N ₂ O	100	180	0,04	0,072	4,500	12,5	10
Ditlenek węgla	(CO ₂) _{abs}	1000	1804	1	1,80	4,250	0,5	15
	(CO ₂) _{abs}	1000	1804	30	54,11	14,000	12,5	25
Metan	CH ₄	100	66	1,5	0,99	3,333	12,5	15

Istnieje możliwość pomiaru sekwencyjnego pojedynczych składników oraz mieszaniny pięciu gazów jednocześnie, przy czym istnieje możliwość zmiany długości fali, aby nie zachodziły interferencje między gazami.

Przed przystąpieniem do badań ustawia się wskazanie zerowe przyrządu przy wykorzystaniu filtra zerowego podłączonego na wlocie analizatora. Filtr do zerowania usuwa większość komponentów zawartych w powietrzu, które absorbują promieniowanie podczerwone. Zerowanie przyrządu należy wykonać w miejscu pomiaru. Daje to pewność, że do wyzerowania analizatora użyto powietrza o tej samej temperaturze i wilgotności, co analizowana próbka (kompensacja wpływu zmian wilgotności i temperatury).

Analizator może być stosowany w badaniach wydajności wymiany powietrza systemu wychwytywania z użyciem znaczników gazowych. Sonda do pobierania próbek powinna składać się z rurki o średnicy wewnętrznej ($10 \pm 1,0$) mm i powinna być połączona z analizatorem gazu przewodami rurowymi elastycznymi. Zbiornik znacznika gazowego powinien być połączony elastycznymi przewodami rurowymi z wtryskiwaczami gazu, a sonda do pobierania próbek z analizatorem gazu. Wylot sondy analizatora gazu dodatkowo trzeba połączyć z przewodem wentylacyjnym poniżej punktu pobierania próbek.

Pomiar stężenia znacznika gazowego należy rozpocząć w momencie otwarcia zaworu butli z gazem i ustalenia jego strumienia objętości w przewodzie wentylacyjnym. Po 200 sekundach trzeba zamknąć dopływ gazu i nadal rejestrować zanik stężenia znacznika gazowego przez co najmniej kolejne 200 sekund.

Następnie należy obliczyć wielkość wymiany powietrza na godzinę n [h^{-1}] zgodnie z PN-EN ISO 12569:2013-05 [17] z gradientu przybliżenia liniowego, stosując wartości zmierzone w zakresie od 80 do 20% początkowego stężenia SF_6 .

Potem trzeba obliczyć wydajność wymiany powietrza e [%] jako iloraz zmierzonej i teoretycznej wielkości wymiany powietrza.

Metoda znaczników gazowych jest powszechnie stosowana w ocenie skuteczności instalacji wentylacji zarówno ogólnej, jak i miejscowej. Metoda ta polega na wprowadzaniu do badanej przestrzeni znanej i określonej ilości gazu jako znacznika oraz obserwacji zmian jego stężenia w określonej objętości powietrza. Dysponując danymi na temat emisji oraz rozkładu stężenia znacznika gazowego

w pomieszczeniu, można określać kierunki i rozkład przepływu powietrza oraz wydajność wymiany powietrza instalacji wentylacji.

Metody znaczników gazowych są głównie wykorzystywane do określania:

- ▶ liczby wymian powietrza w pomieszczeniach
- ▶ rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza
- ▶ skuteczności odciągów miejscowych
- ▶ międzystrefowych przepływów powietrza.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 12569:2013-05 [17] podczas wyboru znaczników gazowych powinny być brane pod uwagę następujące kryteria:

- ▶ zerowa lub niska toksyczność
- ▶ trwałość chemiczna znacznika w temperaturze prowadzenia badań
- ▶ brak wzajemnego oddziaływania z zanieczyszczeniami obecnymi w pomieszczeniu
- ▶ mały stopień zalegania w pomieszczeniu (niski poziom tła)
- ▶ warunki emisji znacznika zbliżone do warunków emisji rzeczywistych zanieczyszczeń
- ▶ gęstość znacznika gazowego powinna być zbliżona do gęstości powietrza lub powinien on być rozcieńczony w powietrzu w warunkach kontrolowanych w celu wzrostu jego zdolności do emisji na drodze dyfuzji.

Istotnym elementem prowadzonych badań emisji zanieczyszczeń powietrza i skuteczności instalacji wentylacji jest sposób wprowadzania znacznika gazowego do określonej przestrzeni oraz sposób poboru próbek. Sposoby te można podzielić na aktywne i pasywne. Metody aktywne polegają na wprowadzaniu znacznika gazowego do przestrzeni pod ciśnieniem i pobieraniu próbek powietrza za pomocą pompek, które przez sieć przewodów rurowych elastycznych dostarczają próbkę do analizatora. Z kolei w metodach pasywnych do transportu próbek znacznika gazowego wykorzystywana jest dyfuzja molekularna. Szczegółowe procedury wprowadzania i próbkowania znacznika gazowego w czasie pomiarów przedstawiono w normie PN-EN ISO 12569:2013-05 [17].

Mimo że metodę znaczników gazowych powszechnie stosuje się w badaniach skuteczności instalacji wentylacji zarówno ogólnej, jak i miejscowej, można ją również stosować do badania emisji zanieczyszczeń powietrza, w tym rozprzestrzeniania się cząstek o nanowymiarach. We wnioskach z dotychczas przeprowadzonych badań emisji cząstek o nanowymiarach wskazano, że w analizie wpływu rozdziału powietrza wentylacyjnego na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń powietrza w przestrzeni roboczej i w otoczeniu procesów obróbki nanomateriałów należy brać pod uwagę różnice w oddziaływaniach znacznika gazowego i nanocząstek aerozoli [18, 19, 20]. W większości badań wartości stężenia znaczników gazowych były wyższe do 25% w odniesieniu do stężenia aerozoli składających się z cząstek o nanowymiarach.

Przykładowa ocena działania instalacji wentylacji i rozdziału powietrza wentylacyjnego w procesach obróbki mechanicznej systemu pianek elastycznych formowanych

Z uwagi na powszechność stosowania i szczególnej szkodliwości obróbki w różnych branżach przemysłu w Polsce i na świecie zbadano działanie instalacji wentylacji i rozdziału powietrza wentylacyjnego podczas obróbki nanomateriałów skrawaniem.

Materiał badawczy

Obróbce (pilarka tarczowa) poddano system pianki poliuretanowej elastycznej formowanej produkcji BASF The Chemical Company stosowany głównie w branży budowlanej w płytach przekładkowych, materiałach izolacyjnych przeznaczonych dla domów pasywnych i o niskim zapotrzebowaniu na energię, różnorodnych

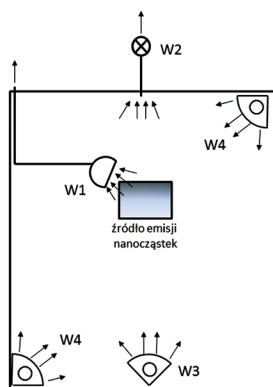
materiałach do izolowania rur oraz w rdzeniach paneli izolacji próżniowej. Piankę tę (zadanie nr 04.A.08 realizowane w CIOP-PIB w ramach II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowywanego w latach 2011–2013 w zakresie służb państwowych) poddano modyfikacji nanometrycznymi tlenkami żelaza Fe_2O_3 (Sigma-Aldrich, Poznań).

Do oceny skuteczności wentylacji zastosowanej podczas emisji w procesie skrawania nanomateriałów stosowano heksafluorek siarki 3.0 (Linde Gaz Polska, Kraków) [17]. Znacznik gazowy generowano w miejscu emisji zanieczyszczeń powietrza za pomocą sond. Parametry aerodynamiczne sond zostały dobrane pod kątem zgodności z parametrami aerodynamicznymi źródeł emisji zanieczyszczeń powietrza. Zastosowano objętościowy typ źródła emisji, które było symulowane przy użyciu układu objętościowego z rozmieszczonymi powierzchniami wylotowymi znacznika gazowego.

W celu określenia wpływu zmian wentylacji w komorze testowej na parametry związane z rozdziałem powietrza wentylacyjnego w przestrzeni roboczej źródeł emisji zanieczyszczenia powietrza stosowanych podczas obróbki skrawaniem nanomateriałów wykorzystano pięć wariantów działania wentylacji (tabela 2, rys. 10).

Tabela 2. Warianty oceny

Wariant	Wentylacja
W0	nieczynna ogólna i miejscowa
W1	czynna miejscowa wywiewna
W2	czynna kierunkowa ogólna i miejscowa
W3	czynna mieszająca ogólna i miejscowa
W4	czynna wyporowa ogólna i miejscowa



Rys. 10. Stanowisko badania rozdziału powietrza wentylacyjnego

Metodyka badań

Podczas realizacji oceny zostało wykonane stanowisko wyposażone w dwa moduły pomiarowe. Pierwszy moduł obejmował układ przygotowania i kontrolowania charakterystyki przepływowej powietrza w otoczeniu źródeł emisji pyłów.

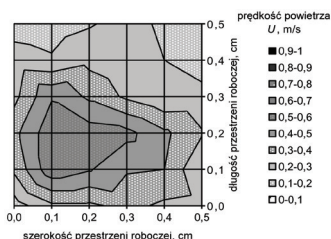
Zmiany prędkości przepływu powietrza w zakresie od 0,10 do 20 m/s określano w drugim module z użyciem zestawu termooanemometrów Testo (Testo AG, Niemcy). Pomiar masowego stężenia znacznika gazowego SF_6 (heksafluorek siarki) w zakresie 0,006–24 mg/m³ wykonywano z użyciem jednowiązkowego spektrofotometru na podczerwień MIRAN SapphiRe 100E (Thermo/Foxboro, USA).

Omówienie wyników oceny

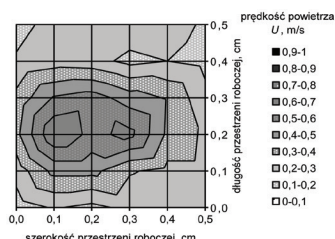
W tabeli 3 oraz na rysunkach 11–12 przedstawiono zmiany lokalnych prędkości przepływu powietrza i intensywności turbulencji powietrza w przestrzeni roboczej źródła emisji zanieczyszczenia powietrza podczas obróbki cięcia w zależności od wariantu wentylacji.

Tabela 3. Zmiany wydajności wymiany powietrza dla wariantów oceny

Wariant	Opis
W0	wzrost prędkości powietrza obejmował strefę centralną przestrzeni roboczej (płaszczyzny do 0,3 cm), w strefie przemieszczania tarczy wartości prędkości zmieniały się w zakresie 0,31–0,64 m/s, poza strefą krytyczną prędkość 0,16–0,24 m/s, brak wentylacji powodował wzrost wskaźnika T_0 do 27,78%
W1	większy i wydłużony obszar zwiększonej prędkości powietrza w zakresie 0,41–0,57 m/s, napływ strumienia powietrza od strefy działania tarczy ku strefie granicznej płaszczyzn 0,4 i 0,3 cm, w obszarach nieobjętych tym strumieniem prędkość 0,15–0,18 m/s, w systemach wentylacji miejscowej maksymalna intensywność turbulencji 33,33%
W2	podobne zróżnicowanie prędkości w zakresie 0,47–0,55 m/s, obszar zwiększonej prędkości powietrza rozszerzył się i obejmował strefę płaszczyzn do 0,4 cm, w obszarach nieobjętych strumieniem wywołanym ruchem tarczy prędkość 0,14–0,17 m/s, w systemach współdziałania wentylacji miejscowej z jednokierunkową wentylacją ogólną maksymalna intensywność turbulencji była największa – 35,29%
W3	mniejsze zróżnicowanie prędkości powietrza w różnych punktach przestrzeni roboczej, prędkość zmieniała się w zakresie 0,13–0,51 m/s, w systemach współdziałania wentylacji miejscowej z mieszającą wentylacją ogólną maksymalna intensywność turbulencji była mniejsza – 29,41%
W4	duże zróżnicowanie prędkości powietrza w różnych punktach komory, prędkość od 0,15 m/s (poza strefą krytyczną) do 0,69 m/s (strefa działania tarczy, systemu wychwytywania i wentylacji wyporowej), napływ strumienia powietrza w płaszczyznach do 0,5 cm, w systemach współdziałania wentylacji miejscowej z mieszającą wentylacją ogólną maksymalna intensywność turbulencji była najmniejsza – 23,52%

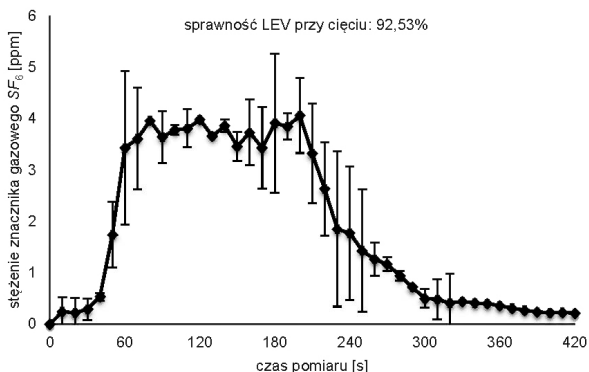


Rys. 11. Rozkład lokalnych prędkości przepływu powietrza dla wentylacji W1



Rys. 12. Rozkład lokalnych prędkości przepływu powietrza dla wentylacji W4

Na rysunku 13 przedstawiono zmiany chwilowego stężenia znacznika gazowego SF_6 w przewodzie systemu wychwytywania źródła emisji zanieczyszczenia powietrza podczas obróbki cięcia w zależności od wariantu wentylacji.



Rys. 13. Zmiany średniego stężenia znacznika gazowego w przewodzie systemu wychwytywania podczas obróbki cięcia – wariant wentylacji W4

Krzywe ilustrujące zmiany stężenia masowego heksafluorku siarki, bez względu na zastosowany rozdział powietrza wentylacyjnego w otoczeniu źródła emisji zanieczyszczenia powietrza, można podzielić na trzy etapy – wzrost, stabilizacja i spadek stężenia SF_6 . Poszczególne etapy rozprzestrzeniania się znacznika gazowego charakteryzowały się zakresem wartości masowych stężeń od 3,5 do 4 ppm w zależności od wariantu wentylacji ogólnej w komorze testowej. Oznaczało to trzykrotny spadek stężenia SF_6 w odniesieniu do wariantu W0. W odniesieniu do skuteczności wentylacji miejscowej zastosowanej przy źródle emisji zanieczyszczenia powietrza większą wydajność wymiany powietrza (ponad 6%) uzyskano przy ustawieniu współdziałania mieszającej wentylacji ogólnej z miejscową wentylacją wywiewną podczas obróbki cięcia.

Analizując wyniki badań, wykazano istotny wpływ zmian w wariacie wentylacji w komorze testowej na parametry związane z rozdziałem powietrza wentylacyjnego w przestrzeni roboczej źródła emisji zanieczyszczenia powietrza podczas obróbki skrawaniem nanomateriałów. Z przeprowadzonych badań rozkładów prędkości przepływu powietrza w otoczeniu obiektu badań wynikało, że

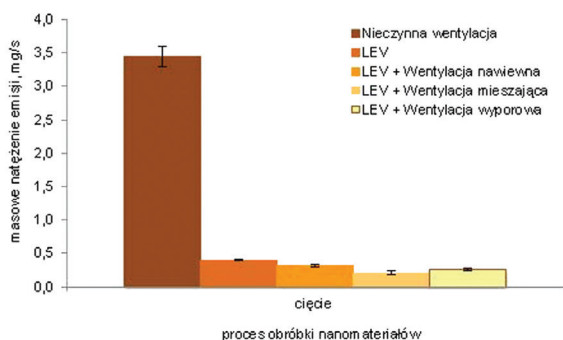
kierunki strumieni powietrza zmieniają się zarówno w płaszczyznach poziomych, jak i pionowych wraz z odległością od źródła emisji.

W przypadku nieczynnej wentylacji stwierdzono napływ strumienia powietrza od źródła emisji ku podłodze komory, przy jednoczesnym wzroście prędkości przepływu powietrza obejmującym jedynie strefę centralną komory. Zastosowanie wentylacji miejscowej wywiewnej w wariantcie W1 spowodowało zróżnicowanie prędkości w pobliżu działania maszyny i systemu wychwytywania.

Ukierunkowany przepływ powietrza ze źródła emisji do odciągu został silnie zmodyfikowany współdziałaniem wentylacji w wariantach W2, W3 i W4, co spowodowało większe zróżnicowanie prędkości powietrza w szerszym zakresie płaszczyzn pomiarowych w otoczeniu źródła.

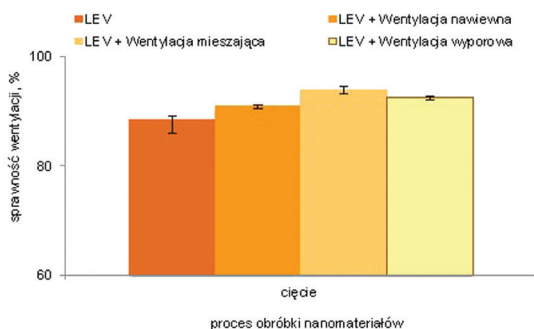
Prędkość powietrza w otoczeniu źródła emisji oraz intensywność turbulencji strumienia odprowadzanego z przestrzeni roboczej emisji miała wpływ na parametry związane z natężeniem emisji nanocząstek i sprawnością działania miejscowej wentylacji wywiewnej w pomieszczeniu. Sprawność wychwytu wentylacji zdefiniowano jako stosunek strumienia masy określonego zanieczyszczenia bezpośrednio wychwytywanego przez odciąg LEV do niekontrolowanego strumienia masy zanieczyszczenia emitowanego z maszyny.

Na rysunku 14 przedstawiono zbiorcze wyniki wartości natężenia emisji zanieczyszczeń powietrza w zależności od zastosowanego wariantu wentylacji. Największe wartości natężenia emisji odnotowano przy nieczynnej wentylacji.



Rys. 14. Zbiorcze zestawienie średnich masowych natężeń emisji zanieczyszczeń z badanych źródeł dla poszczególnych wariantów wentylacji

Na rysunku 15 przedstawiono zbiorcze wyniki wpływu wariantu wentylacji w otoczeniu źródła emisji zanieczyszczenia powietrza na sprawność zastosowanego systemu wychwytywania.



Rys. 15. Zbiorcze zestawienie średnich sprawności różnych wariantów wentylacji zastosowanych podczas cięcia nanomateriałów

Zastosowanie wszystkich czterech wariantów współdziałania wentylacji ogólnej i miejscowej umożliwiło zmniejszenie natężenia emisji zanieczyszczenia powietrza podczas prowadzenia badanych obróbek skrawaniem nanomateriałów. Największe wartości natężenia emisji zanieczyszczeń otrzymano dla przypadku stosowania tylko wentylacji miejscowej wywiewnej (W1), natomiast największy spadek jego wartości zarejestrowano dla przypadku współdziałania wentylacji ogólnej mieszającej z wentylacją miejscową wywiewną (W3).

Sprawność wychwyty zmieniała się wraz z zastosowanym typem współdziałania wentylacji ogólnej i wentylacji miejscowej oraz wahała się w zakresie 72,52–96,63%.

W wyniku zestawienia średnich wartości sprawności wychwyty dla poszczególnych wariantów wentylacji stwierdzono, że kształtując ruch powietrza w ramach współdziałania mieszanej wentylacji ogólnej i wentylacji miejscowej wywiewnej, można wychwytywać zanieczyszczenia powietrza ze sprawnością 94,8%. Najmniej skuteczne okazało się wychwytywanie zanieczyszczeń z użyciem tylko wentylacji miejscowej wywiewnej (83,8%).

Podsumowanie

Pomiary anemometrycznych przepływów powietrza mają duże znaczenie w ocenie działania instalacji wentylacji miejscowej i rozdziału powietrza wentylacyjnego przy źródle emisji zanieczyszczenia powietrza podczas obróbki skrawaniem nanomateriałów w warunkach laboratoryjnych. Metody te pozwalają na zobrazowanie i określenie roli parametrów charakterystycznych dla procesu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza ze źródła ich emisji.

Określenie powyższych zależności umożliwia obserwatorowi ocenę wpływu poszczególnych czynników lokalnych i prawidłowości zastosowanej koncepcji rozdziału powietrza wentylacyjnego do rodzaju źródła emisji cząstek o nanowymiarach.

Bibliografia

- [1] SNG Judy, Chia Sin-ENG, *Nanotechnology health and safety – What can occupational health professionals do?*, Industrial Health 2011, 49, 545.
- [2] <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/nauka-i-technika/biotechnologia-i-nanotechnologia-w-polsce-w-2014-r-,10,3.html>, dostęp z 29.02.2016 r.
- [3] A. Scott, E. Zhou, *The increased use of nanotechnology in China's biotech industry. Life science leader*, James Publishing Inc. 2010.
- [4] http://www.oecd.org/about/0,3347,en_2649_37015404_1_1_1_1_37465,00.html, dostęp z 1 marca 2016 r.
- [5] E. Jankowska, *Nanoobiekty w środowisku pracy*, Podstawy Metody Oceny Środowiska Pracy 2011, 4(70), 7.
- [6] K. Savolainen, L. Pylkkänen, H. Norppa, G. Falck, H. Lindberg, T. Tuomi, *Nanotechnologies, engineered nanomaterials and occupational health and safety – A review*, Safety Sci. 2010, 48, 8, 957.
- [7] https://osha.europa.eu/en/publications/literature_reviews/workplace_exposure_to_nanoparticles/view, dostęp z 1.03.2016 r.

- [8] Y.Y. Kao, T.J. Cheng, D.M. Yang, C.T. Wang, Y.M. Chiung, P.S. Liu, *Demonstration of an olfactory bulb-brain translocation pathway for ZnO nanoparticles in rodent cells in vitro and in vivo*, J. Mol. Neurosci. 2012, 48, 2, 464.
- [9] G. Oberdorster, Z. Sharp, V. Atudorei, A. Elder, R. Gelein, W. Kreyling, C. Cox, *An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles*, Inhalation Toxicology 2004, 16, 437.
- [10] A.M. Świdwińska-Gajewska, S. Czerczak, *Nanomateriały – propozycje dopuszczalnych poziomów narażenia na świecie a normatywy higieniczne w Polsce*, Med. Pracy 2013, 64 (6), 829.
- [11] <http://www.nanotechia.org/global-news/nanotech-2010-mandatory-reporting-nano-regulation>, dostęp z 1.03.2013 r.
- [12] J. Brown, K. Zeman, W. Bennett, *Ultrafine particle deposition and clearance in the healthy and obstructed lung*, Am. J. Respir. Crit. Care. Med. 2002, 166, 1240.
- [13] E.D. Kuemle, C.L. Geraci, P.A. Schulte, *Risk Assessment and Risk Management of Nanomaterials in the Workplace: Translating Research to Practice*, Ann. Occup. Hyg. 2012, 56, 5, 491.
- [14] D. Kondej, T.R. Sosnowski, *Effect of clay nanoparticles on model lung surfactant: a potential marker of hazard from nanoaerosol inhalation*, Env. Sci. Pollut. Res. 2016, 23, 4660.
- [15] PN-EN ISO 5167-1:2005. *Pomiary strumienia płynu za pomocą zwęzków pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym – Część 1: Zasady i wymagania ogólne*.
- [16] PN-EN 12599:2013-04. *Wentylacja budynków – Procedury badań i metody pomiarowe dotyczące odbioru wykonanych instalacji wentylacji i klimatyzacji*.
- [17] PN-EN ISO 12569:2013-05. *Izolacja cieplna w budynkach. Określanie wymiany powietrza w budynkach. Metoda gazu znacznikowego*.
- [18] F.W. Boelter, C.E. Simmons, L. Berman, P. Scheff, *Two-Zone Model Application to Breathing Zone and Area Welding Fume Concentration Data*, Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2009, 6, 298.
- [19] V. Cesard, E. Belut, C. Prevost, A. Taniere, N. Rimbart, *Assessing the Containment Efficiency of a Microbiological Safety Cabinet During the Simultaneous Generation of a Nanoaerosol and a Tracer Gas*, Ann. Occup. Hyg. 2013, 57, 345.
- [20] K.H. Dunn, C. Su-Jung Tsai, S.R. Woskie, J.S. Bennett, A. Garcia, M.J. Ellenbecker, *Evaluation of Leakage From Fume Hoods Using Tracer Gas, Tracer Nanoparticles and Nanopowder Handling Test Methodologies*, Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2014, 11, 164.