

Badanie pylistości nanomateriałów metodą bębna obrotowego¹

Testing dustiness of nanomaterials with a rotating drum

mgr inż. PIOTR SOBIECH
e-mail: pisob@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa
ul. Czerniakowska 16

Słowa kluczowe: pylistość, nanomateriały, bęben obrotowy, mały bęben obrotowy.
Keywords: dustiness, nanomaterials, rotating drum, small rotating drum.

Streszczenie

W ostatnich latach jest obserwowany dynamiczny rozwój nanotechnologii w bardzo wielu dziedzinach przemysłu. Z tego względu, coraz istotniejsze stają się badania mające na celu prognozowanie narażenia na nanomateriały podczas procesu ich wytwarzania i wykorzystywania. Jednym z parametrów wpływającym m.in. na narażenie inhalacyjne na nanomateriały (w postaci proszków) jest ich pylistość. Dotychczas opracowano wiele metod badania pylistości materiałów. W większości tych metod do badania pylistości materiałów zastosowano metodę gravimetryczną. Metoda ta jest jednak metodą niewystarczającą podczas charakteryzowania pyłu

uwalnianego z nanomateriałów. Pylistość jest bowiem parametrem, który jest uzależniony nie tylko od właściwości badanego materiału, lecz także od metody, jaką została ona określona, dlatego istnieje potrzeba opracowania znormalizowanego podejścia do zagadnienia badania pylistości nanomateriałów. Prace nad opracowaniem znormalizowanego podejścia do zagadnienia badania pylistości nanomateriałów są obecnie prowadzone w ramach współpracy międzynarodowej na zlecenie Komisji Europejskiej.

W artykule omówiono zagadnienia związane z badaniem pylistości materiałów, przedstawiono działania prowadzone nad przystosowaniem już

¹ Publikacja przygotowana na podstawie badań wykonanych w ramach zadania nr 2.Z.04 programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” – etap III w zakresie służb państwowych, dofinansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Naukowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy-Państwowy Instytut Badawczy.

istniejących metod badawczych do charakteryzowania pyłu uwalnianego z nanomateriałów oraz działania związane z opracowywaniem nowych metod badania pylistości nanomateriałów.

W artykule opisano metodę małego bębna obrotowego do badania pylistości nanomateriałów.

Metoda polega na generowaniu aerozolu w ściśle określonych warunkach podczas ruchu obrotowego bębna. Uwolniony podczas procesu pył jest analizowany grawimetrycznie oraz metodami matematycznymi.

Summary

Nanotechnology is a fast-growing area in many industries. Therefore, research related to potential risks (especially inhalation exposure) linked to the processes of production and handling of nanomaterials is even more important. Dustiness of nanomaterials is a major risk factor in inhalation exposure to airborne particles released from powdered nanomaterials. There are many methods for evaluating the dustiness of materials. Most of them use gravimetric analysis, which is insufficient to characterize dust released from nanomaterials. Since dustiness is a parameter that depends not only on the properties of a material,

but also on the method of its determination, it is necessary to develop a standardized approach. This has been commissioned by the European Commission. This paper describes issues related to methods of testing dustiness, adapting existing methods and creating new methods for characterizing dust released from nanomaterials. It also describes a method of testing dustiness of nanomaterials with a small rotating drum. This method generates an aerosol under controlled conditions during drum rotation. Dust released during the process is analysed gravimetrically and by counting.

WPROWADZENIE

Nanomateriały znajdują obecnie zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach przemysłu. Wykorzystuje się je między innymi do: produkcji kosmetyków, farb, różnego typu powłok, smarów, opakowań, elementów elektronicznych, materiałów budowlanych i wielu innych (*Janowska* 2011; *Zapór* 2012; *Broekhuizen* i in. 2011; *Czarnecki* 2001). Wzrastająca liczba zastosowań oraz popularność nanomateriałów wynikają z faktu, iż charakteryzują się one wyjątkowymi parametrami mechanicznymi oraz właściwościami: cieplnymi, chemicznymi, elektrycznymi oraz biologicznymi (*Nanomateriały...* 2011). Podczas procesów technologicznych związanych z wykorzystywaniem nanomateriałów (w formie proszków) do powietrza może być uwalniany pył. Pył ten może: wywoływać negatywne skutki zdrowotne u wdychających go ludzi, wpływać na niewłaściwą pracę maszyn oraz stwarzać potencjalne zagrożenie wybuchowe. Z tego względu, coraz istotniejsze stają się badania mające na celu

opracowanie metod prognozowania zagrożeń (zwłaszcza narażenia inhalacyjnego) związanych z uwalnianiem się pyłu z nanomateriałów podczas różnych procesów technologicznych.

Jednym z parametrów istotnych w prognozowaniu tych zagrożeń jest pylistość nanomateriałów. Informacja na temat skłonności uwalniania pyłu do powietrza (pylistości) z nanomateriału może posłużyć np. przedsiębiorcom i inżynierom do ograniczenia niepożądanych skutków związanych z emisją pyłu przez odpowiednie zaprojektowanie procesów lub wybór (jeśli to możliwe) nanomateriałów mniej pylistych. Informacje te są również ważne dla osób zajmujących się higieną pracy oraz dla samych pracowników. Producenci nanomateriałów natomiast mogą podejmować działania powodujące taką modyfikację ich produktów, aby charakteryzowały się one mniejszą pylistością (PN:EN 15051 2006; *Kuhlbusch* i in. 2011; *Fraser* i in. 2010).

Dotychczas opracowano wiele metod badania pylistości materiałów. W większości z nich zastosowano metodę grawimetryczną, która jednak podczas charakteryzowania pyłu uwalnianego z nanomateriałów jest metodą niewystarczająca (Kuhlbusch i in. 2011; zalecenie Komisji (2011/696/U3) z dnia 18.10. 2011 r. dotyczące definicji nanomateriału).

Stanowiska do badania pylistości nanomateriałów powinny być wyposażone w aparaturę umożliwiającą pomiar wielkości istotnych z punktu widzenia charakteryzowania nanomateriałów. Obecnie, w ramach współpracy międzynarodowej, są opracowywane normy dotyczące badania pylistości nanomateriałów. Wśród normalizowanych metod znalazły się dwie metody wykorzystujące metodę bębna obrotowego, które są zawarte w normie EN 15051(2006) oraz w jednej z zastępujących ją norm, tj. w normie EN 15051-2(2013) (PN-EN 15051-2:2014-02).

Pylistość – informacje ogólne

W 2006 r. została wydana norma EN 15051, w której pylistość materiału została zdefiniowana jako jego skłonność do uwalniania pyłu do powietrza podczas różnego typu procesów technologicznych czy transportowo-magazynowych, np. mieszania, pakowania, przesywania, lecz z pominięciem procesów, w których materiał jest mechanicznie rozdrabniany, np. w wyniku cięcia, kruszenia czy szlifowania. Metody opisane w tej normie umożliwiają badanie pylistości stałych materiałów: sproszkowanych, granulowanych i w postaci peletów. Metody te są oparte tylko na metodzie grawimetrycznej, która w przypadku badania pylistości nanomateriałów jest metodą niewystarczającą.

Pylistość materiałów jest parametrem względnym, który jest uzależniony nie tylko od właściwości fizykochemicznych samego

materiału, lecz także od metody, jaką pylistość była określana (PN:EN 15051 2006; Lidén 2006; Evans i in. 2013; Pensis i in. 2006). Wynika to z faktu, iż w różnych metodach do materiału dostarczana jest inna ilość energii. Dlatego też uzyskiwane wyniki można porównywać tylko z wynikami uzyskanymi taką samą metodą (PN:EN 15051 2006; Hamelman, Schmidt 2004; Hjemsted, Schneider 1996).

Różnorodność metod wynika przede wszystkim z faktu, iż nie jest możliwe symulowanie wszystkich procesów technologicznych tylko jedną metodą.

Badanie pylistości materiałów metodą bębna obrotowego, zgodnie z normą EN 15051-2(2013)

Jedną z metod badania pylistości materiałów, która została zawarta w normie EN 15051 (2006), a następnie w normie EN 15051-2 (2013), jest metoda bębna obrotowego. Metoda ta jest odpowiednia do symulowania tych procesów technologicznych, w których pył jest uwalniany w wyniku wielokrotnego przesywania. Schemat stanowiska do badania pylistości metodą bębna obrotowego znajduje się m.in. w artykule Jankowska, Sobiech (2013).

W metodzie tej reprezentatywna próbka materiału o objętości około 35 cm³ jest umieszczana w poziomo ustawionym bębnie obrotowym o średnicy 300 mm wykonanym ze stali nierdzewnej. Wewnątrz bębna jest wspawanych osiem podłużnych łopatek umożliwiających przesywanie się materiału, podczas ruchu obrotowego bębna. W trakcie trwania eksperymentu (60 s) przez bęben jest przepuszczany określony strumień oczyszczonego powietrza (0,63 dm³/s), który porywa uwolnione z materiału cząstki (frakcję wdychalną) i transportuje je do sekcji pobierania próbek. Sekcja pobierania próbek jest złożona z dwóch selektorów cząstek, które są wykonane w postaci metalowych pianek, oraz z filtra końcowego.

Pianka metalowa jednego z selektorów charakteryzuje się porowatością 20 ppi (porów na cal bieżący). Porowatość drugiego selektora wynosi 80 ppi. Na podstawie zmian masy selektorów i filtru końcowego przed badaniem i po badaniu są określone wskaźniki pylistości frakcji: wdychalnej, torakalnej i respirabilnej, zgodnie z poniższymi wzorami:

$$w_w = \frac{\Delta m_{20} + \Delta m_{80} + \Delta m_f}{\Delta m_p},$$

$$w_t = \frac{\Delta m_{80} + \Delta m_f}{\Delta m_p},$$

$$w_R = \frac{\Delta m_f}{\Delta m_p},$$

gdzie:

w_w – wskaźnik masowy frakcji wdychalnej, w mg/kg,

w_t – wskaźnik masowy frakcji torakalnej, w mg/kg,

w_R – wskaźnik masowy frakcji respirabilnej, w mg/kg,

Δm_{20} – masa pyłu zebranego na piance o porowatości 20 ppi, w mg,

Δm_{80} – masa pyłu zebranego na piance o porowatości 80 ppi, w mg,

Δm_f – masa pyłu zebranego na filtrze końcowym, w mg,

Δm_p – masa próbki wykorzystanej do badań, w kg.

Dla każdego materiału wykonuje się co najmniej trzy badania. Na podstawie uśrednionych wyników pylistość danych frakcji jest kategoryzowana do jednej z czterech kategorii, tj.: bardzo mała, mała, umiarkowana, duża. Na podstawie wyników nowych badań zmieniono w normie EN 15051-2(2013) wartości wskaźników masowych wszystkich frakcji pyłu dla poszczególnych kategorii w odniesieniu do normy EN 15051(2006). Klasyfikację zgodnie z normą EN 15051-2(2013) przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Klasyfikacja pylistości dla metody bębna obrotowego zgodnie z normą EN 15051-2(2013)

Kategoria pylistości	Wskaźnik masowy pylistości frakcji wdychalnej, mg/kg	Wskaźnik masowy pylistości frakcji torakalnej, mg/kg	Wskaźnik masowy pylistości frakcji respirabilnej, mg/kg
Bardzo mała	< 300	< 80	< 10
Mała	300 ÷ 650	80 ÷ 300	10 ÷ 60
Umiarkowana	> 650 ÷ 3000	> 300 ÷ 1000	> 60 ÷ 210
Duża	> 3000	> 1000	> 210

Pylistość powinna być określana dla materiału w takiej postaci, w jakiej został on dostarczony od producenta. Niestety, podczas transportu może dojść do zjawiska rozwarstwienia się materiału na warstwy o różnej wielkości cząstek. Dlatego też ważne jest, aby próbki materiału do badania były przygotowane z zapewnieniem ich reprezentatywności. Istnieje wiele znormalizowanych metod pobierania próbek sproszkowanych materiałów, które zostały

zawarte m.in. w normach BS 3406 i DIN 51703-3. Jeśli podczas przygotowywania próbki materiału wystawia się go dłuższy czas na działanie powietrza atmosferycznego, to może nastąpić zmiana wilgotności materiału, co w konsekwencji może wpłynąć na końcową ocenę pylistości materiału.

W praktyce można używać prostej techniki przygotowywania próbek. Przed pobraniem każdej z próbek należy obracać wielokrotnie

zamknięte opakowanie w celu wymieszania jego zawartości. Należy pamiętać, aby w opakowaniu było wystarczająco dużo wolnej przestrzeni, która umożliwi pełne wymieszanie materiału. Następnie próbkę do badań należy pobrać z górnej warstwy materiału.

Przed przystąpieniem do badania pylistości materiału należy określić zawartość wilgoci w materiale oraz jego gęstość. W normie EN 15051-1(2013) w załączniku A przedstawiono metody oznaczania zawartości wilgoci w analizowanych materiałach. W normie tej dopuszczono wykorzystanie automatycznych urządzeń (wagosuszarek), które działają na zasadzie pomiaru spadku masy materiału w wyniku dostarczanego ciepła, np. za pomocą promieniowania podczerwonego. Dobór czasu suszenia oraz masy proszku są uzależnione od zaleceń producenta analizatora oraz od właściwości samego materiału. Jako metodę alternatywą zaproponowano metodę opartą na analizie zmian masy materiału, który jest poddawany wypiekaniu na szalkach Petriego w temperaturze 100 °C przez minimum 4 h. Można również wykorzystać inne metody, jeśli dają takie same wyniki, jak metoda opisana wcześniej.

Sposób oznaczania gęstości materiału został opisany natomiast w załączniku B normy EN 15051-1(2013). Gęstość jest obliczana na podstawie pomiaru masy ściśle określonej objętości materiału, który jest umieszczany w cylindrze miarowym. Procedurę określania gęstości należy tak przeprowadzić, by w cylindrze nie znajdowały się wolne przestrzenie. Można to uzyskać dzięki delikatnemu ostukaniu cylindra, np. za pomocą gumowego młotka.

Pylistość materiałów może być także uzależniona od warunków środowiskowych, w jakich te materiały są przechowywane oraz wykorzystywane. Duże znaczenie, zwłaszcza w przypadku materiałów higroskopijnych, może mieć wilgotność powietrza. Wilgoć zawarta w powietrzu może wchodzić w interakcje z cząstkami materiału, wpływając na siły kohezji, co

z kolei ma wpływ na tworzenie się aglomeratów. Wilgoć może powodować powstawanie płynnych mostków między cząstkami oraz powodować zbrylanie się materiału i w konsekwencji zmniejszenie pylistości (*Schneider, Jensen 2008; Brockel i in. 2006; Hamelmann, Schmidt 2005*). Z tego względu przyjęto w normie EN 15051(2006), że powietrze wykorzystywane do badań powinno charakteryzować się określonymi parametrami. Dopuszczalna wartość wilgotności względnej powietrza powinna wynosić $40 \div 60\%$, zaś jego temperatura – $18 \div 24$ °C.

Wskaźniki masowe pylistości dla poszczególnych frakcji pyłu są określane na podstawie pomiarów grawimetrycznych. Ważenie selektorów i filtru końcowego powinno odbywać się zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie ISO 15767(2009). Pomieszczenie wagowe powinno mieć możliwość regulacji i utrzymania warunków środowiskowych, tj. ustalonej wilgotności względnej powietrza oraz temperatury powietrza.

Pylistość nanomateriałów

Ze względu na fakt, iż obecnie nie ma dostępnych odpowiednich norm dotyczących badania pylistości materiałów, zostały podjęte działania mające na celu opracowanie znormalizowanego podejścia do badania pylistości nanomateriałów.

Nanomateriały bardzo często są poddawane takim samym procesom technologicznym, jak materiały o większych wymiarach cząstek (*Dahman, Monz 2011*). Przyjęto zatem, że ogólne założenia zawarte w normie EN 15051 (2006) są słuszne, a opisane w niej metody mogą zostać zmodyfikowane do potrzeb badania pylistości nanomateriałów. W metodach pomiaru pylistości zawartych w normie EN 15051 (2006) stosuje się metodę grawimetryczną. Jednak ze względu na specyficzne właściwości nanomateriałów (wymiar cząstek,

wielkość powierzchni właściwej) określenie pylistości tylko metodą grawimetryczną jest niewystarczające. Zgodnie z zaleceniem Komisji z dnia 18.10.2011 r. dotyczącym definicji nanomateriałów, charakteryzując nanomateriały należy określać stężenie liczbowe oraz rozkład wymiarowy cząstek, zwłaszcza w zakresie wymiarowym $1 \div 100$ nm, a także jest zalecany pomiar stężenia powierzchniowego cząstek. Istotne jest też badanie zawartych w uwalnianym z nanomateriałów pyłu cząstek o większych wymiarach. Wynika to z faktu, iż uwalniane cząstki mogą występować w postaci agregatów lub aglomeratów o wymiarach większych niż 100 nm (Kuhlbusch i in. 2011; Jankowska, Sobiech 2013). W związku z tym, stanowiska do pomiaru pylistości nanomateriałów powinny być wyposażone w aparaturę umożliwiającą określanie w czasie rzeczywistym takich parametrów, jak: stężenie liczbowe, rozkład wymiarowy nanocząstek oraz stężenie powierzchniowe cząstek. Nowo projektowane metody badania pylistości są ukierunkowane również na znaczne zmniejszenie ilości materiału wykorzystywanego podczas pojedynczego pomiaru (Evans i in. 2013; Schneider, Jensen 2008).

Aparatura do charakteryzowania uwolnionego pyłu podczas badań pylistości nanomateriałów

Opracowywane metody badania pylistości nanomateriałów do charakteryzowania nanoobjektów zawartych w uwalnianym pyłu wykorzystują specjalistyczną aparaturę pomiarową.

Poniżej podano przykłady aparatury najczęściej stosowanej do badania pylistości nanomateriałów (podane zakresy pomiarowe mogą różnić się w zależności od modelu przyrządu):

- APS (*aerodynamic particle sizer*) – pomiar stężenia i rozkładu wymiarowego cząstek o średnicach aerodynamicznych z zakresu $0,5 \div 20$ μm

- FMPS (*fast mobility particle sizer*) – pomiar stężenia i rozkładu wymiarowego cząstek w zakresie $5,6 \div 560$ nm; średnica klasyfikowana ze względu na ruchliwość elektryczną cząstek
- SMPS (*scanning mobility particle sizer*) – pomiar stężenia i rozkładu wymiarowego cząstek w zakresie $2,5 \div 1000$ nm; średnica klasyfikowana ze względu na ruchliwość elektryczną cząstek
- ELPI (*electrical low pressure impactor*) – pomiar stężenia i rozkładu wymiarowego cząstek w zakresie średnicy aerodynamicznej $6 \text{ nm} \div 10$ μm
- CPC (*condensation particle counter*) – pomiar stężenia liczbowego cząstek w zakresie $7 \text{ nm} \div > 3$ μm
- P-TRAK (*ultrafine particle counter*) – pomiar stężenia liczbowego cząstek w zakresie $20 \text{ nm} \div 1$ μm
- AeroTrak (9000), (*nanoparticle aerosol monitor*) – pomiar stężenia powierzchniowego cząstek w zakresie $10 \div 1000$ nm.

Metody badania pylistości nanomateriałów przy użyciu bębna obrotowego

Komisja Europejska, w ramach mandatu M/461 „Standardisation activities regarding nanotechnologies and nanomaterial” („Działalność normalizacyjna dotycząca nanotechnologii i nanomateriałów”), zleciła europejskim organizacjom normalizacyjnym przygotowanie norm dotyczących określania pylistości nanomateriałów oraz sposobu jej kategoryzacji. Wśród metod, które są poddawane normalizacji, znalazły się dwie metody wykorzystujące działanie bębna obrotowego. W pierwszej metodzie jest stosowany bęben obrotowy opisany w normie EN 15051-2 (2013) z zachowaniem wszystkich parametrów procesu, natomiast w drugiej metodzie – mały bęben obrotowy. Me-

toda małego bębna obrotowego została opracowana w Danii (*Schneider, Jensen 2008*) i polega na wykorzystaniu do badań pylistości nanomateriałów bębna obrotowego, który stanowi pomniejszoną wersję metody z bębniem zawartej w normie EN 15051(2006). Średnica bębna została zmniejszona do 163 mm. Objętość części, w której jest generowany aerozol, wynosi 4,80 dm³ (w bębnie opisanym w normie 15051(2006) objętość ta wynosi 16,25 dm³).

W celu uzyskania analogicznych warunków generowania aerozolu, jak ma to miejsce w dużym bębnie, wprowadzono dodatkowe modyfikacje. We wnętrzu bębna umieszczono trzy

łopatki, zamiast ośmiu łopatek, a także zmieniono prędkość obrotową bębna z czterech obrotów na minutę do jedenastu obrotów. Dzięki temu uzyskano w obydwu przypadkach bardzo zbliżoną częstotliwość przesywania się materiału wewnątrz bębna. Aby uzyskać analogiczny rozkład prędkość powietrza, ustalono, że strumień powietrza powinien wynosić na wejściu do bębna 11 dm³/min. Bardzo dużą zaletą małego bębna obrotowego jest niewielka (6 g) ilość nanomateriału potrzebna do wykonania jednego testu.

W tabeli 2. porównano metodę małego bębna obrotowego z metodą zawartą w normie EN 15051-2 (2013).

Tabela 2.

Porównanie metody małego bębna obrotowego z metodą bębna zawartą w normie EN 15051-2(2013)

Parametry	Bęben obrotowy (RD)	Mały bęben obrotowy (SRD)
Średnica wewnętrzna	300 mm	163 mm
Długość części cylindrycznej	228 mm	228 mm
Przepływ powietrza	38 dm ³ /min	11 dm ³ /min
Prędkość obrotowa	4/min	11/min
Liczba łopatek	8	3
Częstotliwość przesywania się nanomateriału	32/min	33/min
Wielkość próbki	35 cm ³	1 ÷ 6 g

Podczas badania pylistości metodą małego bębna obrotowego część generowanego w bębnie aerozolu jest poddawana analizie za pomocą aparatury pomiarowej do pomiaru: stężeń liczbowych, rozkładu wymiarowego uwalnianych cząstek oraz stężenia powierzchniowego (FMPS, APS, CPC). Pozostała część aerozolu po przejściu przez cyklon (GK 2.69) jest analizowana metodą gravimetryczną w celu określenia masowego wskaźnika frakcji respirabilnej.

Przed przystąpieniem do badań nowego nanomateriału należy dokładnie wyczyścić cały układ pomiarowy. Testy właściwe są poprzedzone testem saturacji, który jest wykonywany przy użyciu 2 g nanomateriału.

Trwający 60 s test saturacji jest wykonywany w celu pokrycia wszystkich wewnętrznych powierzchni układu pyłem i jest przeprowadzany przy wyłączonej aparaturze pomiarowej oraz z pominięciem pobierania aerozolu na filtr pomiarowy (analizy gravimetrycznej). Następnie są wykonywane minimum trzy testy właściwe. Po umieszczeniu 6 g proszku w bębnie jest uruchamiana aparatura pomiarowa, natomiast bęben jest uruchamiany dopiero wówczas, gdy w przepływającym powietrzu nie będą wykrywane cząstki. Bezpośrednio przed uruchomieniem bębna do linii pobierania próbek jest włączany cyklon wraz z filtrem po-

miarowym. Czas generowania aerozolu (obrot bębna) trwa 60 s. Po zatrzymaniu pracy bębna pobieranie aerozolu trwa jeszcze 120 s w celu zebrania pozostałych cząstek, które zostały uwolnione podczas procesu przesywywania nanoproszku. Po każdym cyklu jest usuwany pozostały proszek znajdujący się w bębnie.

Po zakończonym badaniu jest obliczany wskaźnik masowy pylistości frakcji respirabilnej pyłu (w_R) na podstawie wzoru:

$$w_R = \frac{Q_b \cdot m_f}{Q_C \cdot m_b},$$

w którym:

Q_b – strumień objętości powietrza wchodzącego do bębna, w dm^3/min ,

Q_C – strumień objętości aerozolu wchodzącego do cyklonu, w dm^3/min ,

m_f – masa pyłu zebranego na filtrze, w mg,

m_b – masa nanoproszku umieszczona w bębnie, w kg.

Wskaźnik liczbowy pylistości (w_{liczb}) danego nanoproszku odniesiony do masy badanego pyłu jest obliczany na podstawie wzoru:

$$w_{\text{liczb}} = \frac{Q_b}{m_b} \cdot \sum_{t=0s}^{t=180s} N_t,$$

w którym:

Q_b – strumień objętości powietrza wchodzącego do bębna, w cm^3/s ,

N_t – całkowita liczba cząstek zmierzona przez licznik cząstek/cząstki.

PODSUMOWANIE

Dynamiczny wzrost wykorzystywania nanomateriałów w przemyśle powoduje, iż coraz istotniejsze staje się prognozowanie narażenia na te nanomateriały podczas różnych procesów technologicznych. Jednym z parametrów wpływającym m.in. na narażenie inhalacyjne na nanomateriały (w postaci proszków) jest ich pylistość, która jest określana podczas badań polegających na generowaniu, w określonych warunkach, aerozolu z nanomateriału, a następnie badaniu zawartych w tym aerozolu nanoobjektów.

Obecnie trwają prace nad przystosowywaniem istniejących metod badawczych do badania nanomateriałów. Podejmowane są również działania w celu opracowania nowych metod badawczych.

W ramach współpracy międzynarodowej podjęto działania, które mają na celu opracowanie europejskich norm w zakresie badania pylistości nanomateriałów. Wśród normalizowanych metod dwie metody wykorzystują do badania pylistości nanomateriałów bębny obrotowe.

PIŚMIENNICTWO

Brockel U., Wahl M., Kirsch R., Feise H.J. (2006) Formation and growth of crystal bridges in bulk solids. *Chemical Engineering & Technology*, vol. 29, 6, 691–695.

Broekhuizen P., Broekhuizen F., Cornelissen R., Reijnders L. (2011) Use of nanomaterials in the European construction industry and some occupational

health aspects thereof. *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 13, 2, 447–462.

Czarnecki L. (2001) Nanotechnologia w budownictwie. *Przegląd Budowlany* 1, 40–53.

Dahman D., Monz C. (2011) Determination of dustiness of nanostructured materials. *Gefahrstoffe*

- Reinhaltung der Luft (2011) vol. 71, 11/12, 481-487.
- Evans D.E., Turkevich L.A., Roettgers C.T., Deye G.J., Baron P.A. (2013) Dustiness of fine and nanoscale powders. *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 57, 2, 261–277.
- Fraser S., Mason H., Thorpe A., Roberts P., Smith I., Evans G., Morton J., Marks D. (2010) A study to investigate ways to reduce the dustiness of bakery ingredients and exposure to allergens [<http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr830.htm>] (stan na dzień 9.02.2015 r.).
- Hamelman F., Schmidt E. (2004) Methods for characterizing the dustiness estimation of powders. *Chemical Engineering & Technology*, vol. 27, 8, 844–847.
- Hamelmann F., Schmidt E. (2005) Methods of estimating the dustiness of industrial powders. A review. *China Particuology*, vol. 3, 1/2, 90–93.
- Hjemsted K., Schneider T. (1996) Dustiness from powder materials. *Journal of Aerosol Science*, vol. 27, suppl. 1, S485-S486.
- Jankowska E. (2011) Nanoobiekty w środowisku pracy. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 4(70), 7–20.
- Jankowska E., Sobiech P. (2013) Metody badania pylistości nanomateriałów. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 1(75), 7–20.
- Kuhlbusch T.A.J., Asbach C., Fissan H., Göhler D., Stintz M. (2011) Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces. A review. *Particle and Fibre Toxicology* 8, 22.
- Lidén G. (2006) Dustiness testing of materials handled at workplaces. *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 50, 5, 437–439.
- Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne (2011) [Red.] K. Kurzydłowski. M. Lewandowska] Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Pensis I., Mareels J., Dahmann D., Mark D. (2010) Comparative evaluation of the dustiness of industrial minerals according to european standard EN 15051 (2006). *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, 2, 204–216.
- Schneider T., Jensen K.A. (2008) Combined single-drop and rotating drum dustiness test of fine to nanosize powders using a small drum. *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 52, 1, 23–24.
- Zapór L. (2012) Bezpieczeństwo i higiena pracy a rozwój nanotechnologii. *Bezpieczeństwo Pracy* 1(484), 4–7.
- EN 15051(2006): Workplace atmospheres-Measurement of the dustiness of bulk materials-Requirements and reference test methods.
- EN 15051-1(2013): Workplace exposure. Measurement of the dustiness of bulk materials. Requirements and choice of test methods.
- EN 15051-2(2013): Workplace exposure. Measurement of the dustiness of bulk materials. Rotating drum metod.
- ISO 15767(2009): Workplace atmospheres – Controlling and characterizing uncertainty in weighing collected aerosols.
- PN-EN 15051(2006): Powietrze na stanowiskach pracy – Pomiar pylistości zebranych materiałów – Wymagania i metody odniesienia.
- PN-EN 15051-2 (2014-02): Narazenie na stanowiskach pracy – Pomiar pylistości materiałów masowych – Część 2: Metoda z zastosowaniem bębna obrotowego.
- Zalecenie Komisji z dnia 18.10.2011 r. dotyczące definicji nanomateriału (2011/696/U3). *Dz. Urz. Unii Europejskiej* 20.10.2011. L 275/38.