

Elżbieta Jankowska

ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ W POWIETRZU NANOBIĘKTÓW WYTWARZANYCH W WYNIKU WŁĄCZENIA KUCHENKI MIKROFALOWEJ

SPREAD OF NANO-OBJECTS IN THE AIR
AS A RESULT OF SWITCHING-ON A MICROWAVE

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy / Central Institute for Labour Protection –
National Research Institute, Warszawa, Poland

Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych / Department of Chemical, Aerosol and Biological Hazards

STRESZCZENIE

Wstęp: W wyniku włączenia w pomieszczeniu kuchenki mikrofalowej w powietrzu są wytwarzane cząstki o nanowymiarach. Wytwarzane cząstki mogą się rozprzestrzeniać w powietrzu w pomieszczeniu. **Materiał i metody:** Badanie rozprzestrzeniania się cząstek w powietrzu w pomieszczeniu przeprowadzono przez określanie stężeń liczbowych i powierzchniowych oraz średnich wymiarów cząstek. Użyto do tego urządzeń DiscMini umiejscowionych w 6 punktach pomiarowych, pozwalających śledzić zmiany parametrów cząstek przede wszystkim w pobliżu źródła ich wytwarzania i w obszarze działania wentylacji miejscowej (dygestorium), a także w innych punktach, np. w pobliżu okna lub w środku pomieszczenia. **Wyniki:** Kiedy dygestorium było wyłączone, tzn. w pomieszczeniu występowała wentylacja zrównoważona, włączenie kuchenki spowodowało 9,42–14,14-krotny wzrost stężeń liczbowych cząstek o nanowymiarach w odniesieniu do tła i 3,51–4,81-krotny wzrost stężeń powierzchniowych. Kiedy dygestorium było włączone, tzn. w pomieszczeniu występowało podciśnienie, włączenie kuchenki spowodowało 3,20–4,43-krotny wzrost stężeń liczbowych cząstek o nanowymiarach w odniesieniu do tła i 1,61–1,89-krotny wzrost stężeń powierzchniowych cząstek. **Wnioski:** Z analizy danych wynika, że włączenie kuchenki mikrofalowej na 5 min skutkuje wytwarzaniem nanoobjektów po ok. 3 min od włączenia kuchenki, z maksymalnymi wartościami stężeń do 12 min od włączenia kuchenki, we wszystkich 6 punktach pomiarowych zlokalizowanych w badanym pomieszczeniu. Dotyczy to obydwu sytuacji, tzn. włączonego i wyłączonego dygestorium. Med. Pr. 2016;67(3):353–363

Słowa kluczowe: nanoobjekty, rozprzestrzenianie się cząstek, kuchenka mikrofalowa, narażenie, stężenie liczbowe i powierzchniowe, średni wymiar cząstek

ABSTRACT

Background: Switching-on a microwave results in the creation of nano-sized particles, which can spread through the air of a given premise, e.g., room. **Material and Methods:** The study was carried out to determine the number and surface concentrations as well as the mean particles size using a DiscMini measurement device distributed in 6 measuring points to track changes of particle parameters, primarily at the source of particle creation and in the area of local ventilation (fume cupboard), and also in other places, e.g., near the window or in the middle of the room. **Results:** Where the fume cupboard was switched-off, i.e., normal pressure ventilation in the room, switching-on the microwave caused a 9.42–14.14-fold increase in the number concentration of nano-sized particles relative to the background and a 3.51–4.81-fold increase in the surface concentration. Where the fume cupboard was switched-on, i.e., negative pressure ventilation in the room switching-on the microwave caused a 3.20–4.43-fold increase in the number concentration of nano-size particles relative to the background and a 1.61–1.89-fold increase in the surface concentration. **Conclusions:** The analysis of the data shows that switching-on a microwave for 5 min results in the creation of nano-objects already after about 3 min with the maximum concentration values after 12 min since switching-on the microwave in all 6 measurement points distributed in the test room. This applies to both situations, i.e., when the fume cupboard was switched-off or switched-on. Med Pr 2016;67(3):353–363

Key words: nano-objects, spread of the particles, microwave, exposure, number and surface concentrations, mean particle size

Autorka do korespondencji / Corresponding author: Elżbieta Jankowska, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: eljan@ciop.pl
Nadesłano: 1 lipca 2015, zatwierdzono: 20 grudnia 2015

Finansowanie / Funding: praca wykonana w ramach projektu IL.P02 „Badanie procesu rozprzestrzeniania się nanoobjektów w powietrzu pomieszczeń pracy” realizowanego w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w ramach programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” III etap, czas realizacji: lata 2014–2016. Kierownik projektu: dr inż. Elżbieta Jankowska.

WSTĘP

Zgodnie z definicją Unii Europejskiej nanomateriał to naturalny, powstały przypadkowo lub celowo wytworzony materiał zawierający cząstki, które występują jako cząstki pojedyncze, agregaty lub aglomeraty, i w którym 50% lub więcej cząstek w liczbowym rozkładzie wymiarowym ma co najmniej jeden zewnętrzny wymiar w zakresie 1–100 nm [1]. Nanomateriałami są więc zarówno celowo wyprodukowane materiały, stosowane obecnie w wielu produktach używanych w życiu codziennym (kosmetykach, farbach, katalizatorach, produktach sportowych, tkaninach, produktach medycznych i ochrony zdrowia, składnikach odżywczych, opakowaniach spożywczych, materiałach budowlanych, elektronice użytkowej itd.), jak i cząstki powstające przypadkowo, np. w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej.

Uzyskiwanie produktów lub stosowanie celowo wytworzonych nanomateriałów w postaci proszków może powodować negatywne skutki zdrowotne, które wynikają z narażenia na nanoobiekty emitowane podczas tych procesów [2–4]. Należy jednak podkreślić, że w przypadku większości rodzajów emitowanych nanoobjektów – w tym nanoobjektów powstających przypadkowo – nie jest znany ich wpływ na zdrowie osób na nie narażonych. Podstawowym działaniem w tym obszarze jest więc uzyskiwanie wiarygodnych informacji na temat narażenia na nanoobiekty, co pozwoli uniknąć w przyszłości potencjalnych problemów zdrowotnych osób narażonych [5–18].

Nanoobiekty wyemitowane podczas procesów z nanomateriałami lub ze źródeł przypadkowych mogą rozprzestrzeniać się w powietrzu w pomieszczeniu, zagrażając zdrowiu osób znajdujących się nie tylko w pobliżu źródeł ich wytwarzania, ale również w pewnej odległości od nich. Rozprzestrzenianie się cząstek o nanowymiarach w całym pomieszczeniu jest uzależnione od lokalizacji źródeł wytwarzania nanoobjektów i stosowanych środków ochrony zbiorowej. Na proces rozprzestrzeniania się nanoobjektów w powietrzu pomieszczenia mogą również istotnie wpływać parametry powietrza, takie jak temperatura, wilgotność i prędkość.

Obecnie nie ma danych eksperymentalnych na temat rozprzestrzeniania się cząstek o nanowymiarach w pomieszczeniach, w których są prowadzone prace z nanomateriałami lub w których cząstki mogą powstawać ze źródeł przypadkowych. Dotychczas prowadzono jedynie badania emisji cząstek o nanowymiarach z uwagi na ocenę potencjalnego narażenia pracowników. Podczas tych badań pomiary wykonywano w jed-

nym punkcie – w pobliżu źródła wytwarzania cząstek o nanowymiarach – lub jednocześnie w 2 punktach, a mianowicie w punkcie pomiarowym w pobliżu źródła emisji cząstek o nanowymiarach oraz w punkcie znajdującym się w znacznej odległości od źródła, jako tzw. tło dalekie (far-field) [17,18]. Badania w różnych punktach pomiarowych, tzn. mapowanie parametrów nanoobjektów, z uwagi na brak dostępności aparatury pomiarowej o małych wymiarach prowadzono dotychczas nie jednocześnie, ale w kolejności, tzn. w różnym czasie w poszczególnych punktach pomiarowych, z reguły z użyciem aparatury badawczej o dużych gabarytach [19].

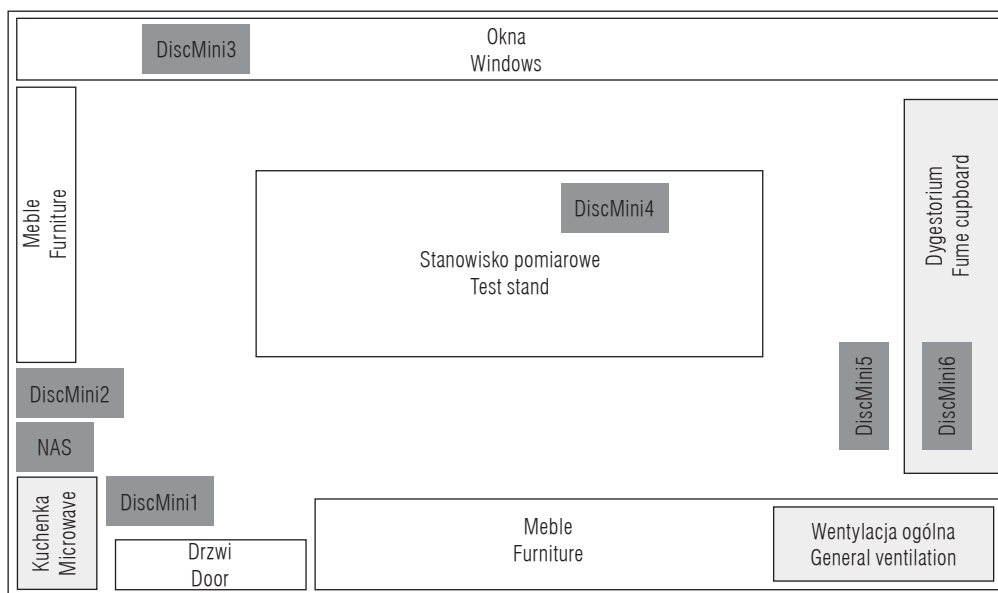
Celem niniejszych badań było określenie, w jaki sposób cząstki wytworzone podczas włączania pustej kuchenki mikrofalowej – bez umieszczania w niej produktów do podgrzewania – mogą rozprzestrzeniać się w pomieszczeniu, kiedy dygestorium jest wyłączone (czyli działała wentylacja zrównoważona) i włączone (czyli działała wentylacja podciśnieniowa).

MATERIAŁ I METODY

Badanie rozprzestrzeniania się cząstek w powietrzu w pomieszczeniu przeprowadzono przez określanie stężeń liczbowych i powierzchniowych cząstek o wymiarach 10–700 nm oraz średnich wymiarów cząstek 10–300 nm. Użyto do tego przenośnych urządzeń DiscMini (Matter Aerosol) umiejscowionych w 6 punktach pomiarowych, pozwalających śledzić zmiany parametrów cząstek przede wszystkim w pobliżu źródła ich wytwarzania i w obszarze działania wentylacji miejscowej (dygestorium), ale również w innych punktach, np. w pobliżu okna lub na środku pomieszczenia. Umieszczenie punktów pomiarowych w pomieszczeniu podczas badania rozprzestrzeniania się cząstek wytworzonych w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej przedstawiono na rycinie 1:

- urządzenie DiscMini1 było umieszczone od strony drzwi kuchenki mikrofalowej (w odległości 30 cm),
- DiscMini2 – w pobliżu ściany bocznej kuchenki mikrofalowej,
- DiscMini3 – w pobliżu okna,
- DiscMini4 – na środku pomieszczenia,
- DiscMini5 – w pobliżu dygestorium, ale jeszcze w pomieszczeniu,
- DiscMini6 – wewnątrz dygestorium.

We wszystkich punktach pomiarowych, tzn. w miejscach usytuowania 6 przyrządów DiscMini, jednocześnie z badaniami parametrów cząstek określano podsta-



DiscMini – przenośny przyrząd pomiarowy / portable measuring device, NAS – próbnik do aerozolu nanometrowego / Nanometer Aerosol Sampler. Wymiary pomieszczenia: długość – 7,3 m; szerokość – 4,8 m; wysokość – 3,8 m / Room dimensions: length – 7.3 m; width – 4.8 m; height – 3.8 m. Odległość między punktami pomiarowymi oznaczono numerami urządzeń DiscMini / The distance between the measuring points, marked by numbers of DiscMini: 1-2 = 0,7 m, 1-3 = 3,7 m, 1-4 = 4 m, 1-5 = 5 m, 1-6 = 5,5 m, 2-3 = 3 m, 2-4 = 3,3 m, 2-5 = 5,2 m, 2-6 = 5,7 m, 3-4 = 2,4 m, 3-5 = 5,3 m, 3-6 = 5,8 m, 4-5 = 2,9 m, 4-6 = 3,4 m, 5-6 = 0,5 m.

Ryc. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w pomieszczeniu podczas badania rozprzestrzeniania się cząstek wytworzonych w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej

Fig. 1. The distribution of measuring points in the room during testing the spread of particles created as the result of switching-on a microwave

wowe parametry powietrza, takie jak temperatura, wilgotność względna i prędkość. W pobliżu kuchenki mikrofalowej, przed jej włączeniem i w czasie jej działania, z zastosowaniem próbnika do aerozolu nanometrowego (Nanometer Aerosol Sampler – NAS, prod. TSI Incorporated, USA) pobierano próbki powietrza (na taśmę – Copper Conductive Tape, Double Sided Adhesive, prod. 3M Cu, USA) do dalszej analizy za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (Field Emission Scanning Electron Microscope – FE-SEM) i spektroskopii z dyspersją energii (Energy-dispersive Spectrometry – EDS) Quantacs 400 (prod. Bruker, UK). Pomiary wykonano w Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny Instytutu Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Typowa kuchenka mikrofalowa – bez umieszczania w niej produktów do podgrzewania – była 2-krotnie włączana na 5 min (w pozycji GRILL +650 W), przy dygestorium wyłączonym (wentylacja zrównoważona) i włączonym (wentylacja podciśnieniowa). Kiedy dygestorium było włączone, strumień powietrza odciganego z dygestorium wynosił 1200 m³/h. Podczas wszystkich badań wentylacja ogólna pomieszczenia była wyłączona, a drzwi i okna zamknięte. Odpływ lub dopływ powietrza z/do pomieszczenia w zależności od tego,

czy dygestorium było wyłączone, czy włączone, odbywał się przez nieszczelności (np. w drzwiach, oknach) i przez otwór wyłączonej wentylacji ogólnej (kratkę wentylacyjną), ponieważ przepustnica zainstalowana w systemie wentylacji ogólnej była w pełni otwarta.

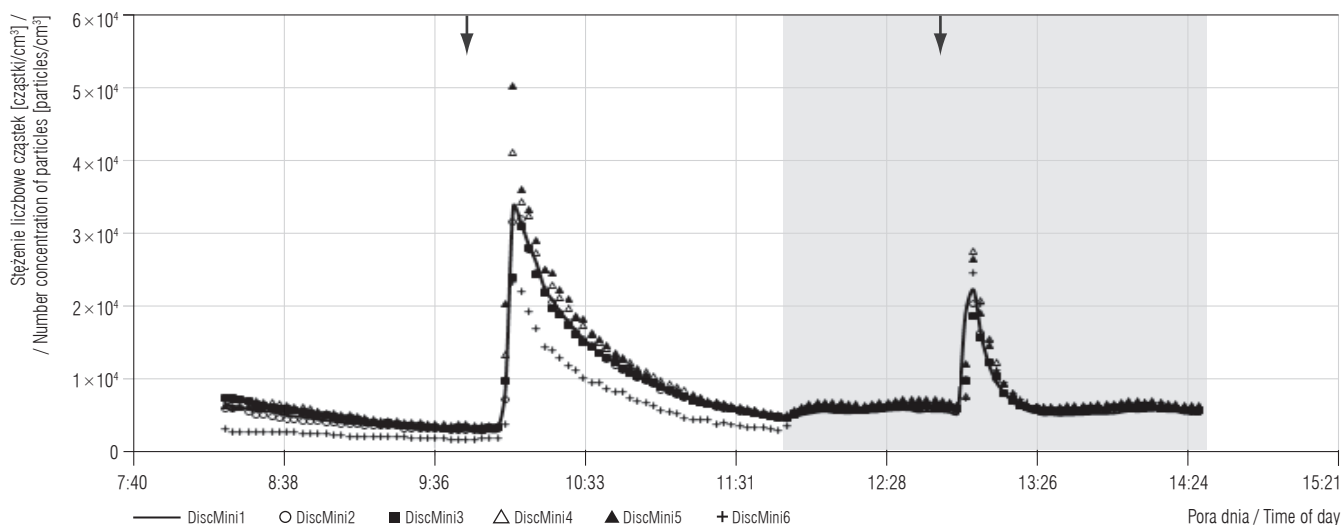
Pomiary rozpoczęto, kiedy dygestorium i kuchenka mikrofalowa były wyłączone. Określono tło stężeń liczbowych i powierzchniowych oraz średnich wymiarów cząstek dla przypadku, kiedy w pomieszczeniu działała wentylacja zrównoważona (pomiary wykonywane w godz. 8:15–9:55). Następnie przy wyłączonym dygestorium na 5 min włączono kuchenkę mikrofalową (o godz. 9:56) oraz obserwowano zmiany stężeń liczbowych i powierzchniowych. Kiedy stężenia liczbowe i powierzchniowe cząstek były zbliżone do stężeń określonych przed włączeniem kuchenki (zbliżone do tła cząstek), włączono dygestorium (o godz. 11:50) i określono tło cząstek w pomieszczeniu przy działającej wentylacji podciśnieniowej (pomiary wykonywane w godz. 11:50–12:52). Następnie powtórnie na 5 min włączono kuchenkę mikrofalową (o godz. 12:53) i pomiary kontynuowano przy włączonym dygestorium do czasu (do godz. 14:30), kiedy stężenia liczbowe i powierzchniowe osiągnęły wartości zbliżone do tych, które określono przed włączeniem kuchenki.

WYNIKI

Wyniki badań rozprzestrzeniania się nanoobjektów uzyskane w 6 punktach pomiarowych z zastosowaniem przyrządów DiscMini przedstawiono na rycinie 2. (stężenia liczbowe cząstek z zakresu 10–700 nm), rycinie 3. (stężenia powierzchniowe cząstek z zakresu 10–700 nm) i rycinie 4. (średnie wymiary cząstek z zakre-

su 10–300 nm). Wyniki badań parametrów powietrza w 6 punktach pomiarowych przedstawiono na rycinie 5. (temperatury powietrza), rycinie 6. (wilgotności względnej powietrza) i rycinie 7. (prędkości powietrza).

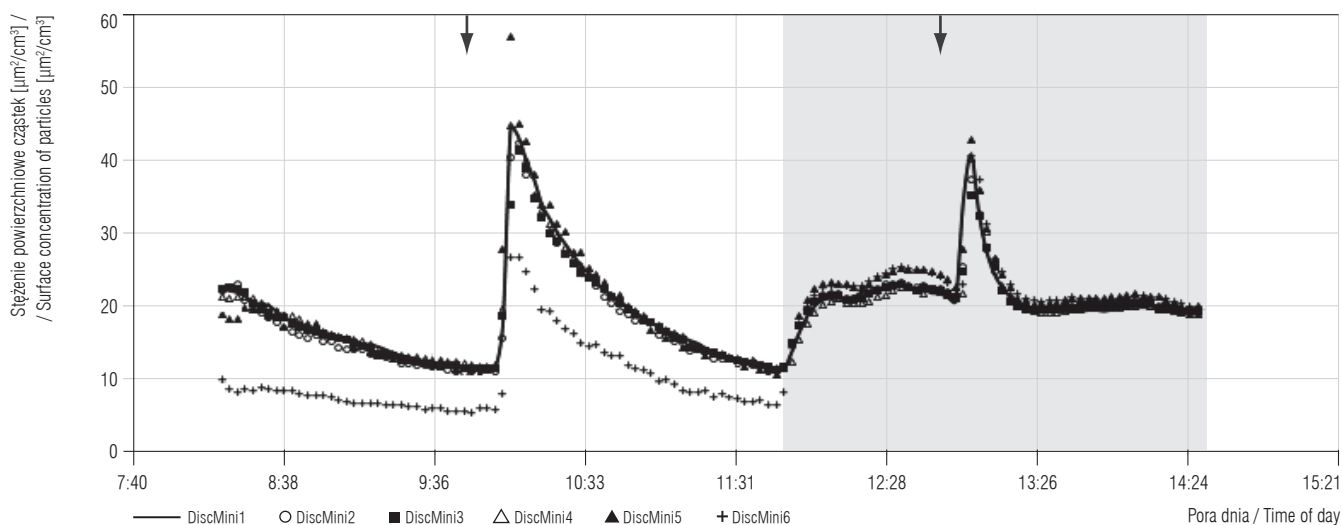
Przebieg zmian stężeń liczbowych i powierzchniowych cząstek tła przy wyłączonym dygestorium (w godz. 8:15–9:55) w 5 punktach pomiarowych (DiscMini1, DiscMini2, DiscMini3, DiscMini4 i Disc-



Obszar zaznaczony szarym prostokątem – dygestorium włączone, strzałki – włączenie kuchenki na 5 min / The area marked by gray rectangle – the fume cupboard switched-on, arrows – the microwave switched-on for 5 min.

Ryc. 2. Stężenie liczbowe cząstek z zakresu 10–700 nm zmierzone w 6 punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne przyrządy DiscMini

Fig. 2. The number concentration of particles within the range of 10–700 nm measured at 6 measuring points, at which DiscMini portable devices were distributed



Objaśnienie jak w rycinie 2 / Explanation as in Figure 2.

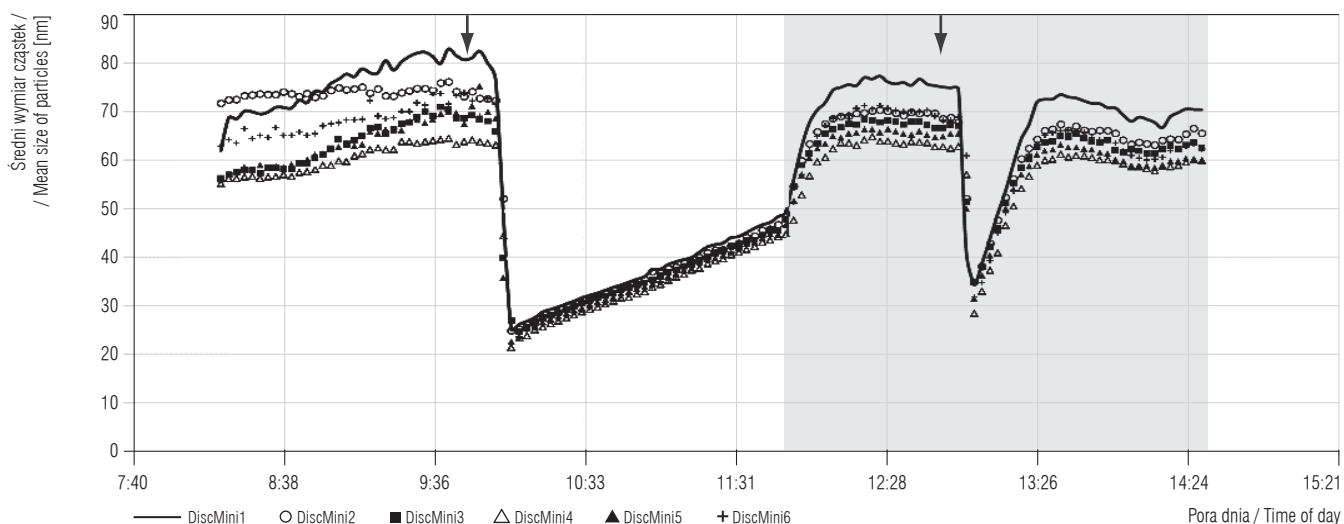
Ryc. 3. Stężenie powierzchniowe cząstek z zakresu 10–700 nm zmierzone w 6 punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne przyrządy DiscMini

Fig. 3. The surface concentration of particles within the range of 10–700 nm measured at 6 measuring points, at which DiscMini portable devices were distributed

Mini5) były do siebie zbliżone. Stwierdzono zmniejszanie się stężeń liczbowych z 5834–7317 cząstek/cm³ (godz. 8:15) do 2878–3512 cząstek/cm³ (godz. 9:55) i stężeń powierzchniowych z 19–23 μm²/cm³ (godz. 8:15) do 12 μm²/cm³ (godz. 9:55). Podobny przebieg zmian stężeń świadczy o dość równomiernym rozkładzie stężeń w punktach pomiarowych zlokalizowanych w pomieszczeniu, mimo że ruch powietrza był z reguły nieznaczny, o czym świadczą niskie wartości prędkości w punktach oznaczonych jako DiscMini1,

DiscMini2, DiscMini3 i DiscMini4 (do 0,1 m/s). Tylko w punkcie pomiarowym oznaczonym jako DiscMini5 prędkości powietrza były nieco wyższe i wynosiły ok. 0,2 m/s (ryc. 7).

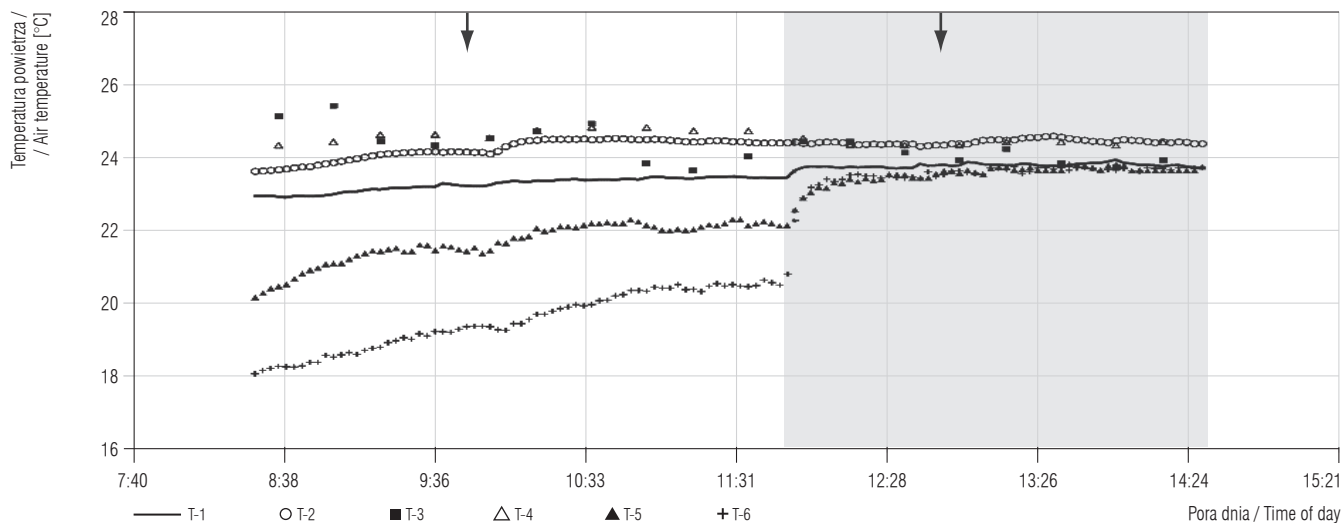
Niższe wartości stężeń, ale również o podobnym przebiegu zmian jak dla punktów umiejscowionych w pomieszczeniu, uzyskano w punkcie pomiarowym oznaczonym jako DiscMini6, czyli zlokalizowanym w dygestorium. Stwierdzono w nim zmniejszanie się stężenia liczbowego z 3099 cząstek/cm³



Objaśnienie jak w rycinie 2 / Explanation as in Figure 2.

Ryc. 4. Średnie wymiary cząstek z zakresu 10–300 nm zmierzone w 6 punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne przyrządy DiscMini

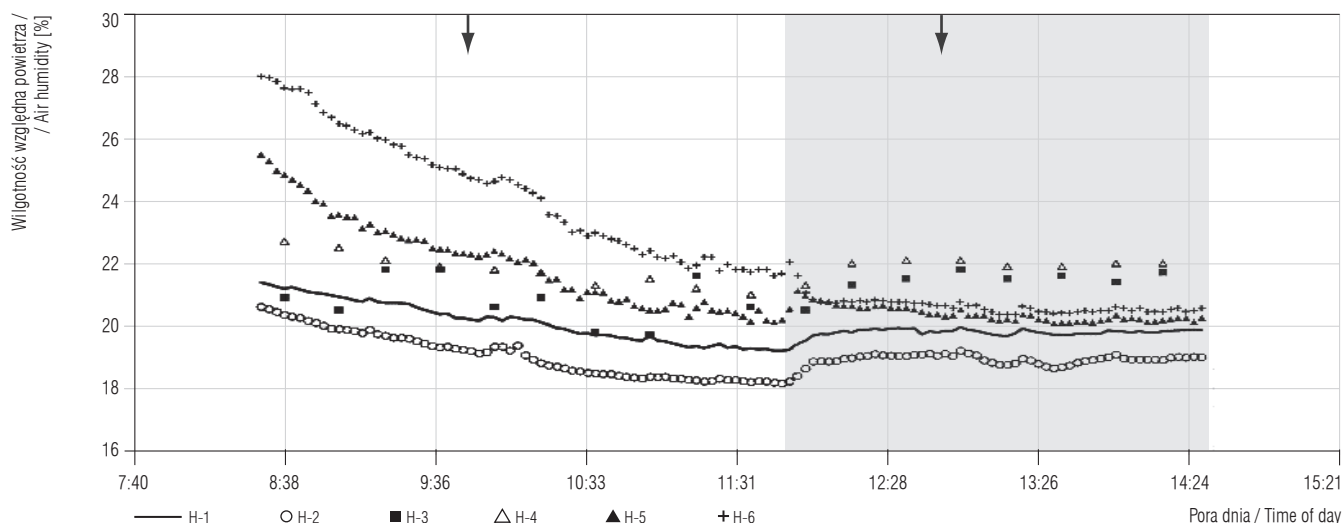
Fig. 4. The mean diameter of particles within the range of 10–300 nm measured at 6 measuring points, at which DiscMini portable devices were distributed



Objaśnienie jak w rycinie 2 / Explanation as in Figure 2.

Ryc. 5. Temperatura powietrza zmierzona w 6 punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne przyrządy DiscMini

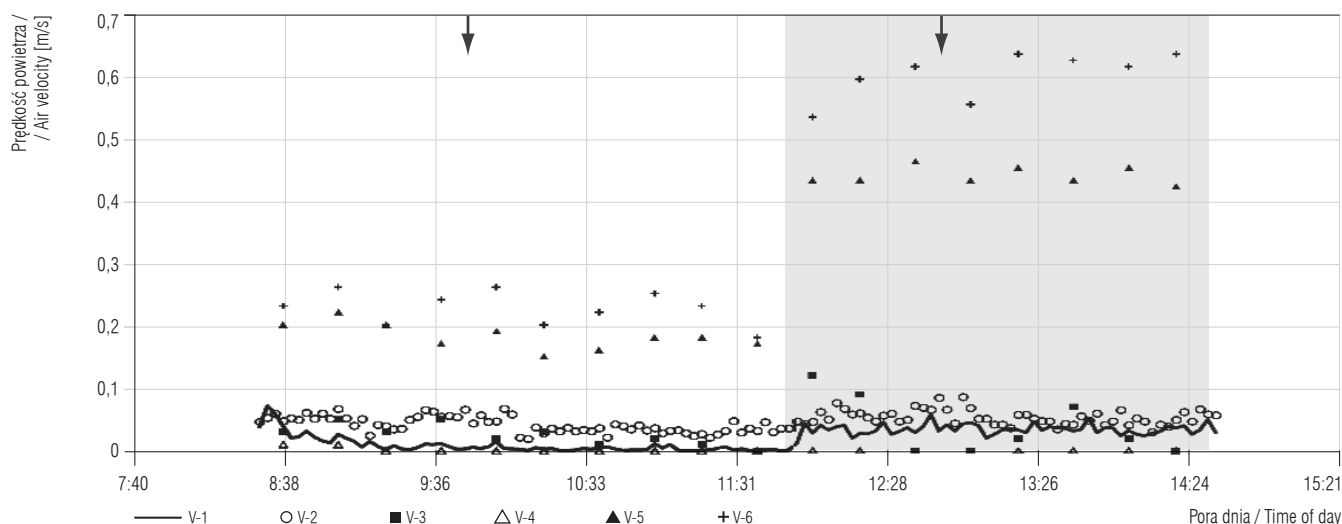
Fig. 5. The air temperature measured at 6 measuring points, at which DiscMini portable devices were distributed



Objaśnienie jak w rycinie 2 / Explanation as in Figure 2.

Ryc. 6. Wilgotność względna powietrza zmierzona w 6 punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne przyrządy DiscMini

Fig. 6. The air humidity measured at 6 measuring points, at which DiscMini portable devices were distributed



Objaśnienie jak w rycinie 2 / Explanation as in Figure 2.

Ryc. 7. Prędkość powietrza zmierzona w 6 punktach pomiarowych, w których były umieszczone przenośne przyrządy DiscMini

Fig. 7. The air velocity measured at 6 measuring points, at which DiscMini portable devices were distributed

(godz. 8:15) do 1730 cząstek/cm³ (godz. 9:55) i stężenia powierzchniowego z 10 μm²/cm³ (godz. 8:15) do 7 μm²/cm³ (godz. 9:55) – przy wyższych wartościach prędkości powietrza (ok. 0,25 m/s) niż w pozostałych punktach pomiarowych, ale tylko nieznacznie wyższych niż w punkcie pomiarowym oznaczonym jako DiscMini5 (0,2 m/s). Trudno ocenić wpływ lokalizacji punktów pomiarowych (punkty w pomieszczeniu czy w dygestorium) na zmienność średnich wymiarów cząstek tła (ryc. 3). Średnie wymiary cząstek wraz z cza-

sem pomiarów wzrastały i zawierały się w zakresie 56–73 nm o godz. 8:15 i w zakresie 64–81 nm o godz. 9:55.

Włączenie kuchenki mikrofalowej na 5 min (o godz. 9:56), przy wyłączonym dygestorium, spowodowało wzrost stężeń liczbowych cząstek w punktach pomiarowych (DiscMini1, DiscMini2, DiscMini3, DiscMini4 i DiscMini5) zlokalizowanych w pomieszczeniu maksymalnie do 30 888–50 147 cząstek/cm³ i stężeń powierzchniowych do 42–57 μm²/cm³. Przy tym największy wzrost zaobserwowano w punktach

pomiarowych najbardziej oddalonych od kuchenki mikrofalowej, czyli oznaczonych jako DiscMini4 i DiscMini5. Niższe maksymalne stężenia liczbowe i powierzchniowe stwierdzono w punkcie oznaczonym jako DiscMini6, czyli w dygestorium. Wynosiły one odpowiednio: stężenie liczbowe – 24 454 cząstek/cm³ i stężenie powierzchniowe – 27 μm²/cm³. Włączenie kuchenki mikrofalowej spowodowało zmniejszenie wymiarów cząstek obecnych w powietrzu w pomieszczeniu i dygestorium do 21–25 nm.

Wpływ włączenia kuchenki na pozostawanie w powietrzu cząstek o wymiarach nanometrowych można określić, śledząc zmiany stężeń liczbowych (ryc. 1) i powierzchniowych (ryc. 2) oraz średnich wymiarów cząstek (ryc. 3) do godz. 11:49. Można zauważyć podobny przebieg spadku stężeń liczbowych i powierzchniowych cząstek, z mniejszymi wartościami dla punktu pomiarowego umiejscowionego w dygestorium (DiscMini6), oraz bardzo zbliżony przebieg wzrostu średnich wymiarów cząstek we wszystkich badanych punktach pomiarowych.

Włączenie dygestorium (o godz. 11:50) spowodowało wzrost stężeń liczbowych i powierzchniowych oraz średnich wymiarów cząstek tła w 6 badanych punktach pomiarowych, odpowiednio: dla stężeń liczbowych z 3045–4938 cząstek/cm³ do 5239–6354 cząstek/cm³, stężeń powierzchniowych z 6–12 μm²/cm³ do 22–24 μm²/cm³ i średnich wymiarów cząstek z 45–50 nm do 63–76 nm.

Włączenie kuchenki mikrofalowej na 5 min (o godz. 12:53) spowodowało wzrost stężeń do wartości maksymalnych zawartych w przedziałach: 18 506–27 370 cząstek/cm³ dla stężeń liczbowych i 35–43 μm²/cm³ dla stężeń powierzchniowych. Kiedy dygestorium było włączone, nie obserwowano już istotnych różnic między przebiegiem zmian stężeń liczbowych i powierzchniowych w punktach zlokalizowanych w pomieszczeniu i w dygestorium. Z kolei przed włączeniem kuchenki mikrofalowej (w godz. 11:50–12:52) obserwowano niewielkie różnice średnich wymiarów cząstek (tła) określonych w różnych punktach pomiarowych (64–81 nm). Włączenie kuchenki spowodowało, że we wszystkich 6 punktach pomiarowych minimalne wartości wymiarów cząstek były bardzo zbliżone i zawierały się w przedziale 28–35 nm. Stwierdzono również, że przy włączonym dygestorium nastąpił szybszy powrót stężeń liczbowych i powierzchniowych oraz średnich wymiarów cząstek do wartości określonych przed włączeniem kuchenki (do wartości tła), niż wtedy, gdy dygestorium było wyłączone.

Zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w publikacji Brouwera i wsp. [5] jako wskaźnik wpływu włączenia kuchenki mikrofalowej na wzrost stężenia liczbowego cząstek w odniesieniu do stężenia tła przyjęto stosunek wartości maksymalnych stężeń uzyskanych w wyniku włączenia kuchenki do wartości określonych bezpośrednio przed włączeniem kuchenki, kiedy dygestorium było wyłączone lub włączone:

$$W_{L,zm.} = C_{L,maks.} / C_{L,tlo} \quad (1)$$

gdzie:

$W_{L,zm.}$ – wskaźnik zmienności maksymalnego stężenia liczbowego cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej w stosunku do stężenia liczbowego cząstek tła,

$C_{L,maks.}$ – maksymalne stężenie liczbowe cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej,

$C_{L,tlo}$ – stężenie liczbowe cząstek tła określone bezpośrednio przed włączeniem kuchenki mikrofalowej.

Wyniki obliczeń wskaźników zmienności $W_{L,zm.}$ stężeń liczbowych przedstawiono w tabeli 1. Wskaźniki zmienności stężeń powierzchniowych $W_{P,zm.}$ obliczono w taki sam sposób jak dla stężeń liczbowych i przedstawiono w tabeli 2.

W przypadku średnich wymiarów cząstek trendy zmian w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej były odwrotne do tych, jakie zaobserwowano w przypadku zmian stężeń liczbowych i powierzchniowych – średnie wymiary cząstek ulegały bowiem zmniejszeniu. Jako wskaźniki zmienności średnich wymiarów cząstek przyjęto stosunek wartości średnich wymiarów cząstek określonych bezpośrednio przed włączeniem kuchenki do minimalnych wartości średnich wymiarów cząstek uzyskanych w wyniku włączenia kuchenki, kiedy dygestorium było wyłączone lub włączone:

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

gdzie:

$W_{W,zm.}$ – wskaźnik zmienności średniego wymiaru cząstek tła w stosunku do minimalnego średniego wymiaru cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej,

$C_{W,tlo}$ – średni wymiar cząstek tła określony bezpośrednio przed włączeniem kuchenki mikrofalowej,

$C_{W,min.}$ – minimalny wymiar cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej.

Wyniki obliczeń wskaźników zmienności $W_{W,zm.}$ średnich wymiarów cząstek przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 1. Wskaźniki zmienności maksymalnego stężenia liczbowego cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej w stosunku do stężenia liczbowego cząstek tła przy wyłączonym i włączonym dygestorium
Table 1. Indicators of variations in the maximum number concentration of particles resulting from switching-on a microwave relative to the number concentration of background particles, with the fume cupboard switched-off/on

Przyrząd pomiarowy Measurement device	Maksymalne stężenie liczbowe cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej [cząstki/cm ³] Maximum number concentration of particles resulting from switching-on a microwave [particles/cm ³] (C _{Lmaks,wyl.})		Stężenie liczbowe cząstek tła bezpośrednio przed włączeniem kuchenki mikrofalowej [cząstki/cm ³] Number concentration of background particles just before switching-on a microwave [particles/cm ³] (C _{Ltlo,wyl.})		Wskaźnik zmienności maksymalnego stężenia liczbowego cząstek w stosunku do stężenia liczbowego cząstek tła Indicator of variation in the maximum number concentration of particles relative to the number concentration of background particles (W _{Lzmn,wyl.})	
	C _{Lmaks,wyl.}	C _{Lmaks,wl.}	C _{Ltlo,wyl.}	C _{Ltlo,wyl.}	W _{Lzmn,wyl.}	W _{Lzmn,wl.}
DiscMini1	33 596	22 228	2 878	5 239	11,67	4,24
DiscMini2	31 847	20 163	2 965	5 957	10,74	3,38
DiscMini3	30 888	18 506	3 280	5 790	9,42	3,20
DiscMini4	41 023	27 370	3 512	6 175	11,68	4,43
DiscMini5	50 147	26 494	3 294	6 354	15,22	4,17
DiscMini6	24 454	23 264	1 730	6 106	14,14	3,81

wyl. – dygestorium wyłączone / fume cupboard switched-off, wl. – dygestorium włączone / fume cupboard switched-on.

Tabela 2. Wskaźniki zmienności maksymalnego stężenia powierzchniowego cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej w stosunku do stężenia powierzchniowego cząstek tła przy wyłączonym i włączonym dygestorium
Table 2. Indicators of variations in the maximum surface concentration of particles resulting from switching-on a microwave relative to the surface concentration of background particles with the fume cupboard switched-off/on

Przyrząd pomiarowy Measurement device	Maksymalne stężenie powierzchniowe cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej Maximum surface concentration of particles resulting from switching-on a microwave [µm ² /cm ³] (C _{Pmaks,wyl.})		Stężenie powierzchniowe cząstek tła bezpośrednio przed włączeniem kuchenki mikrofalowej Surface concentration of background particle just before switching-on a microwave [µm ² /cm ³] (C _{Ptlo,wyl.})		Wskaźnik zmienności maksymalnego powierzchniowego stężenia cząstek w stosunku do powierzchniowego stężenia cząstek tła Indicator of variation in the maximum surface concentration of particles relative to the surface concentration of background particles (W _{Pzmn,wyl.})	
	C _{Pmaks,wyl.}	C _{Pmaks,wl.}	C _{Ptlo,wyl.}	C _{Ptlo,wyl.}	W _{Pzmn,wyl.}	W _{Pzmn,wl.}
DiscMini1	44	41	12	22	3,75	1,89
DiscMini2	42	37	12	22	3,55	1,69
DiscMini3	42	35	12	22	3,51	1,61
DiscMini4	45	40	12	22	3,67	1,84
DiscMini5	57	43	12	24	4,81	1,79
DiscMini6	27	41	7	24	4,07	1,72

Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

Tabela 3. Wskaźniki zmienności średniego wymiaru cząstek tła w stosunku do minimalnego średniego wymiaru cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej przy wyłączonym i włączonym dygestorium
Table 3. Indicators of variations in the mean size of background particles relative to the minimum mean size of particles resulting from switching-on a microwave, with the fume cupboard switched-off/on

Przyrząd pomiarowy Measurement device	Minimalny średni wymiar cząstek w wyniku włączenia kuchenki mikrofalowej Minimum mean size of particles resulting from switching-on a microwave [nm] ($C_{W, \text{min.}}$)	Średni wymiar cząstek tła bezpośrednio przed włączeniem kuchenki mikrofalowej Mean size of background particles just before switching-on a microwave [nm] ($C_{W, \text{tło}}$)	Wskaźnik zmienności średniego wymiaru cząstek tła w stosunku do minimalnego średniego wymiaru cząstek Indicator of variation in the mean size of background particles relative to the minimum mean size of particles ($W_{W, \text{zm.}}$)
	$C_{W, \text{min.}, \text{wyl.}}$	$C_{W, \text{tło}, \text{wyl.}}$	$W_{W, \text{zm.}, \text{wyl.}}$
DiscMini1	25	81	3,24
DiscMini2	25	74	2,96
DiscMini3	25	69	2,76
DiscMini4	21	64	3,05
DiscMini5	22	71	3,23
DiscMini6	22	74	3,36

Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

OMÓWIENIE

Wyniki badań wskazują, że włączenie kuchenki mikrofalowej na 5 min skutkowało wytwarzaniem – najprawdopodobniej w wyniku procesu nukleacji – znacznej liczby cząstek o nanowymiarach, które natychmiast ulegały rozprzestrzenieniu w całym pomieszczeniu. Nanoobjekty były wytwarzane po ok. 3 min od włączenia kuchenki, a maksymalne wartości stężeń pojawiały się do 12 min od włączenia kuchenki we wszystkich 6 punktach pomiarowych zlokalizowanych w pomieszczeniu i dygestorium. Dotyczy to obydwu sytuacji, tzn. dygestorium wyłączzonego (wentylacja zrównoważona) i włączonego (wentylacja podciśnieniowa).

Kiedy dygestorium było wyłączone, tzn. kiedy w pomieszczeniu działała wentylacja zrównoważona, włączenie kuchenki spowodowało 9,42–14,14-krotny wzrost stężeń liczbowych cząstek o nanowymiarach w odniesieniu do tła w 6 punktach pomiarowych i 3,51–4,81-krotny wzrost stężeń powierzchniowych. Wytworzone cząstki utrzymywały się w powietrzu z reguły do ok. 80 min zanim osiągnęły wartości zbliżone do tła sprzed włączenia kuchenki. Maksymalne stężenia liczbowe cząstek w 6 punktach pomiarowych wahały się w zakresie 24 454–50 147 cząstek/cm³, a stężenia powierzchniowe w zakresie 42–57 μm²/cm³. Tła stężeń liczbowych cząstek w badanych punktach pomiarowych bezpośrednio przed włączeniem kuchenki zawierały się w zakresie 1730–3512 cząstek/cm³, natomiast tła stężeń powierzchniowych cząstek w zakresie 7–12 μm²/cm³.

Kiedy dygestorium było włączone, tzn. kiedy w pomieszczeniu występowało podciśnienie, włączenie kuchenki spowodowało 3,20–4,43-krotny wzrost stężeń liczbowych cząstek o nanowymiarach w odniesieniu do tła w 6 punktach pomiarowych i 1,61–1,89-krotny wzrost stężeń powierzchniowych cząstek. Wytworzone cząstki utrzymywały się w powietrzu z reguły do ok. 30 min zanim osiągnęły wartości zbliżone do tła sprzed włączenia kuchenki. Maksymalne stężenia liczbowe cząstek w 6 punktach pomiarowych wahały się w zakresie 18 506–27 370 cząstek/cm³, a stężenia powierzchniowe w zakresie 35–43 μm²/cm³. Tła stężeń liczbowych cząstek w badanych punktach pomiarowych bezpośrednio przed włączeniem kuchenki zawierały się w zakresie 5239–6354 cząstek/cm³, natomiast tła stężeń powierzchniowych cząstek w zakresie 22–24 μm²/cm³, tzn. były znacznie wyższe niż wtedy, gdy dygestorium było wyłączone. Może to wynikać z tego, że panujące w pomieszczeniu podciśnienie spo-

wodowało napływ cząstek z powietrzem atmosferycznym przez nieszczelności.

Kiedy dygestorium było wyłączone, na skutek włączenia kuchenki w powietrzu w pomieszczeniu rozprzestrzeniały się cząstki o średnich wymiarach 21–25 nm, natomiast kiedy dygestorium było włączone, były to cząstki o średnich wymiarach 28–35 nm. Tło średnich wymiarów cząstek zawieszonych w powietrzu w pomieszczeniu bezpośrednio przed włączeniem kuchenki to cząstki o wymiarach 64–81 nm przy wyłączonym dygestorium i cząstki z zakresu 63–76 nm przy włączonym dygestorium. Włączenie kuchenki mikrofalowej wpłynęło więc na zmniejszenie średnich wymiarów cząstek w odniesieniu do tła. Krotności zmniejszenia się średnich wymiarów cząstek w 6 punktach pomiarowych były następujące – 2,76–3,36 przy dygestorium wyłączonym i 1,94–2,25 przy włączonym.

Parametry powietrza w różnych punktach pomiarowych były zależne od tego, czy dygestorium było włączone, czy wyłączone. Przy wyłączonym dygestorium temperatura powietrza wynosiła 18–26°C, wilgotność względna – 18–28%, a prędkość – 0–0,3 m/s, z większymi wartościami w punktach pomiarowych, w których były umieszczone DiscMini5 (w pobliżu dygestorium) i DiscMini6 (wewnątrz dygestorium). Kiedy dygestorium było włączone, temperatura i wilgotność względna powietrza we wszystkich punktach pomiarowych były bardziej do siebie zbliżone i wynosiły, odpowiednio: 23–25°C i 18–22%. Prędkości powietrza znacznie wzrosły do ok. 0,45 m/s w pobliżu DiscMini5 i ok. 0,6 m/s w pobliżu DiscMini6. W pozostałych punktach pomiarowych wartości prędkości powietrza były zbliżone lub nieznacznie wyższe od jej wartości przy wyłączonym dygestorium. Z mierzonych parametrów powietrza najistotniejszy wpływ na parametry cząstek (stężenie liczbowe, stężenie powierzchniowe i średni wymiar) miały prędkość powietrza i rodzaj wentylacji w pomieszczeniu (zrównoważona czy podciśnieniowa).

W próbkach powietrza pobranych (na taśmę – 3M Cu) podczas włączenia kuchenki mikrofalowej nie stwierdzono obecności innych cząstek (wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą SEM+EDS) niż cząstki typowe dla tła pomieszczenia (pojedyncze cząstki pochodzące z powietrza atmosferycznego). Należy jednak podkreślić, że metody pobierania próbek z powietrza do ich dalszej analizy z zastosowaniem SEM+EDS są dopiero opracowywane, a skuteczność wychwytywania cząstek z powietrza z użyciem komercyjnie dostępnego NAS nie jest jeszcze w pełni oszacowana.

WNIOSKI

Włączenie kuchenki mikrofalowej skutkowało:

- wytworzeniem znacznej liczby cząstek o nanowymiarach (21–35 nm), które natychmiast rozprzestrzeniały się w pomieszczeniu i utrzymywały w powietrzu ok. 80 min przy wyłączonym dygestorium i ok. 30 min przy włączonym dygestorium – cząstki powstawały najprawdopodobniej w wyniku procesu nukleacji wywołanej pracą kuchenki mikrofalowej;
- wzrostem stężeń liczbowych cząstek (10–700 nm) w odniesieniu do tła – 9,42–14,14-krotnym przy dygestorium wyłączonym (wentylacja zrównoważona) i 3,20–4,43-krotnym przy dygestorium włączonym (wentylacja podciśnieniowa);
- wzrostem stężeń powierzchniowych cząstek (10–700 nm) w odniesieniu do tła – 3,51–4,81-krotnym przy dygestorium wyłączonym (wentylacja zrównoważona) i 1,61–1,89-krotnym przy dygestorium włączonym (wentylacja podciśnieniowa);
- spadkiem średnich wymiarów cząstek w odniesieniu do tła – 2,76–3,36-krotnym przy dygestorium wyłączonym (wentylacja zrównoważona) i 1,94–2,25-krotnym przy dygestorium włączonym (wentylacja podciśnieniowa).

Włączenie dygestorium skutkowało widocznym wzrostem stężeń liczbowych i powierzchniowych cząstek tła, co może wynikać z tego, że panujące w pomieszczeniu podciśnienie powodowało napływ cząstek z powietrzem atmosferycznym przez nieszczelności.

PIŚMIENNICTWO

1. Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial (text with EEA relevance) (2011/696/EU). DzU UE L 275/38 z dnia 20 października 2011 r.
2. Oberdörster G., Gelein R.W.K., Cox C.: Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal. Toxicol.* 2004;16:437–445, <http://dx.doi.org/10.1080/08958370490439597>
3. Bihari P., Holzer M., Praetner M., Fent J., Lerchenberger M., Reichel C.A. i wsp.: Single-walled carbon nanotubes activate platelets and accelerate thrombus formation in the microcirculation. *Toxicology* 2010;269(2–3): 148–154, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tox.2009.08.011>
4. Kreyling W.G., Semmler-Behnke M., Seitz J., Szymczak W., Wenk A., Mayer P. i wsp.: Size dependence of the translocation of inhaled iridium and carbon nanopar-

- title aggregates from the lung of rats to the blood and secondary target organs. *Inhal. Toxicol.* 2009;21 Suppl. 1: 55–60, <http://dx.doi.org/10.1080/08958370902942517>
5. Brouwer D., Berges M., Virji M.A., Fransman W., Bello D., Hodson L. i wsp.: Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects; report of a workshop. *Ann. Occup. Hyg.* 2012;56(1):1–9, <http://dx.doi.org/10.1093/annhyg/mer099>
 6. Brouwer D., van Duuren-Stuurman B., Berges M., Bard D., Jankowska E., Moehlmann C. i wsp.: Workplace air measurements and likelihood of exposure to manufactured nano-objects, agglomerates, and aggregates. *J. Nanopart. Res.* 2013;15:2090, <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-013-2090-7>
 7. Smith R.W., Sahl J.D., Kelsh M.A., Zalinski J.: Task-based exposure assessment: Analytical strategies for summarizing data by occupational groups. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1997;58:402–412, <http://dx.doi.org/10.1080/15428119791012630>
 8. Ramachandran G.: Toward better exposure assessment strategies – The new NIOSH initiative. *Ann. Occup. Hyg.* 2008;52:297–301, <http://dx.doi.org/10.1093/annhyg/men025>
 9. Ogura I.: Guide to measuring airborne carbon nanotubes in workplaces [Internet]: Technology Research Association for Single Wall Carbon Nanotubes (TASC), Research Institute of Science for Safety and Sustainability (RISS), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba 2013 [cytowany 10 lipca 2015]. Adres: http://www.aist-riss.jp/downloads/CNTs_Eng_20131028.pdf
 10. Kaluza S., Balderhaar J., Orthen B., Honnert B., Jankowska E., Pietrowski P. i wsp.: Workplace exposure to nanoparticles [Internet]: European Agency for Safety and Health at Work 2009 [cytowany 10 lipca 2015]. Adres: https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/literature_reviews/workplace_exposure_to_nanoparticles
 11. Methner M., Hodson L., Geraci C.: Nanoparticle emission assessment technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials – Part A. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2010;7:127–132, <http://dx.doi.org/10.1080/15459620903476355>
 12. British Standards Institution. PD 6699–3:2010. Nanotechnologies. Guide to assessing airborne exposure in occupational settings relevant to nanomaterials. Institution, London 2010
 13. Jankowska E., Łukaszewska J.: Potencjalne narażenie na nanocząstki srebra podczas rozpylania preparatu do czyszczenia klimatyzacji. *Med. Pr.* 2013;64(1):57–66, <http://dx.doi.org/10.13075/mp.5893/2013/0007>
 14. Schneider T., Brouwer D., Koponen I., Jensen K., Fransman W., van Duuren-Stuurman B. i wsp.: Conceptual model for assessment of inhalation exposure to manufactured nanoparticles. *J. Exp. Sci. Environ. Epidemiol.* 2011;21:450–463, <http://dx.doi.org/10.1038/jes.2011.4>
 15. European Commission: The behaviour of aerosols released to ambient air from nanoparticle manufacturing – Publishable final activity report. Nanotransport [Internet]. Commission 2008 [cytowany 10 lipca 2015]. Adres: <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/124584951EN6.pdf>
 16. Neubauer N., Weis F., Binder A., Seipenbusch M., Kasper G.: A highly sensitive technique for detecting catalytically active nanoparticles against a background of general workplace aerosols. *J. Phys. Conf. Ser.* 2011;304(1):1–9, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/304/1/012011>
 17. Brouwer D., van Duuren-Stuurman B., Berges M., Jankowska E., Bard D., Mark D.: From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects. *J. Nanopart. Res.* 2009;11(8):1867–1881, <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-009-9772-1>
 18. Kuhlbusch T., Asbach C., Fissan H., Gohler D., Stintz M.: Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. *Part. Fibre Toxicol.* 2011;8(22):1–18, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-8977-8-22>
 19. Witschger O.: Instrumentation and strategies for characterizing exposure to nanoaerosols. W: 4th International Conference on Nanotechnology – Occupational and Environmental Health; 26–29 sierpnia 2009; Helsinki, Finland [Internet]: Finish Institute of Occupational Health, Helsinki 2009 [cytowany 10 lipca 2015]. Adres: http://www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia_arvot_visio/Documents/Nanoprogram.pdf