

dr MAŁGORZATA GOŁOFIT-SZYMCAK
 mgr ANNA ŁAWNICZEK-WAŁCZYK
 dr hab. n. med. RAFAŁ L. GÓRNY, prof. nadzw. CIOP-PIB
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy

Bioaerozole w pomieszczeniach pracy – źródła i zagrożenia



Jakość powietrza wewnętrznego jest głównym determinantem zdrowia i dobrego samopoczucia przebywających w nim osób. Na jakość powietrza w pomieszczeniach wpływają zanieczyszczenia chemiczne, pyłowe i biologiczne oraz parametry mikroklimatu. Źródłem zanieczyszczeń mikrobiologicznych pomieszczeń mogą być pracownicy, elementy konstrukcyjne i wyposażenie budynków, instalacje wentylacyjne (klimatyzacyjne) oraz powietrze zewnętrzne. W środowisku wewnątrz, czynniki biologiczne (np. bakterie, grzyby, endotoksyny, glukany lub mikotoksyny), będąc transportowane drogą powietrzną mogą powodować wiele niekorzystnych skutków zdrowotnych u narażonych osób.

Bioaerosols in indoor workplaces – hazards and their sources

Indoor air quality is a major determinant of people's health and well-being. Air quality in buildings depends on numerous biological, chemical and dust contaminants as well as microclimate parameters. People, construction materials, ventilation (air-conditioning) systems and outdoor air are major sources of microbial contamination indoors. In an indoor environment, biological agents (e.g., bacteria, fungi, endotoxins, glucans or mycotoxins) transported via air can cause numerous adverse health outcomes in exposed individuals.

Wstęp

W ostatnich latach coraz częściej zwraca się uwagę na jakość powietrza wewnętrznego. Dorosły człowiek spędza około 90% czasu w pomieszczeniach, z czego około 25% w pracy [1]. Osoby przebywające w pomieszczeniach często skarżą się na zmęczenie, uczucie duszności, bóle i zawroty głowy, drażliwość, obniżenie zdolności koncentracji uwagi, zaburzenia pamięci, podrażnienie błon śluzowych oczu i górnych dróg oddechowych oraz zmiany skórne. Ten zespół niespecyficznych, subiektywnych objawów pojawiających się w następstwie przebywania w pomieszczeniach określono jako „syndrom chorego budynku” (*Sick Building Syndrome, SBS*) lub „syndrom szczelnego budynku” (*Tight Building Syndrome, TBS*), a choroby pojawiające się w następstwie przebywania w nadmiernie zanieczyszczonym środowisku wewnętrznym „chorobami związanymi z budynkiem” (*Building Related Illnesses, BRI*).

Jakość powietrza wewnętrznego jest zatem głównym determinantem zdrowia i dobrego samopoczucia osób przebywających w pomieszczeniach. Mają na nią wpływ zanieczyszczenia chemiczne, pyłowe i biologiczne oraz parametry mikroklimatu.

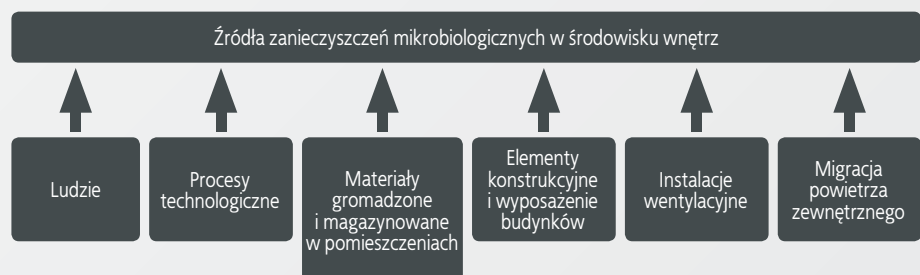
Źródła szkodliwych czynników biologicznych

Budynki są stale narażone na kolonizację przez mikroorganizmy. W powietrzu wewnętrznym – poza specjalnie wydzielonymi pomieszczeniami czystymi (takimi jak np. strefy produkcji aseptycznej w przemyśle farmaceutycznym) – są one zawsze obecne. Jeśli czynniki biologiczne (np. wirusy, bakterie, grzyby) występują w niskich stężeniach i nie ma wśród nich organizmów patogennych, nie stanowią zagrożenia dla ludzi. Problem mikrobiologicznego skażenia pojawia się wówczas, gdy poziom zanieczyszczeń mikrobiologicznych wzrasta ponad określoną granicę, uznaną za normalną (naturalną) dla danego środowiska.

W rozprzestrzenianiu się szkodliwych czynników biologicznych (SCB) w środowisku

wewnętrznym największe znaczenie ma droga powietrzna. Liczne drobnoustroje, ich toksyny i alergeny, rozprzestrzeniając się w postaci bioaerozolu, mogą wnikać do układu oddechowego, wywołując w nim szereg skutków zdrowotnych. Mogą też odpowiadać za zmiany patologiczne skóry czy błon śluzowych oczu, nosa i jamy ustnej.

Mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza w środowisku wewnętrznym może być wynikiem emisji czynników szkodliwych w samym pomieszczeniu lub pochodzić ze środowiska zewnętrznego. Głównym źródłem cząstek biologicznych w pomieszczeniach są organizmy żywe, tj. ludzie, zwierzęta oraz rośliny, a także materiały gromadzone w budynkach i powietrze zewnętrzne wnikające do pomieszczeń (rys.), [2, 3].



Rys. Źródła zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza w środowisku wewnętrznym
 Fig. Sources of microbial air contamination in an indoor environment

W nieprzemysłowym środowisku wewnętrznym dominującym źródłem cząstek biologicznych są ludzie [4]. Ścieranie się naskórka oraz bezpośrednia emisja mikroorganizmów w czasie oddychania, mówienia, kaszlu czy kichania są głównymi procesami generującymi cząstki bioaerozolu. Każdy ruch powietrza powodowany przez człowieka (np. przemieszczanie się czy prowadzenie prac porządkowych) stanowi istotny element w uwalnianiu cząstek biologicznych do powietrza, głównie poprzez proces tzw. wtórnej emisji.

Organizm ludzki jest zasiedlany przez olbrzymią ilość mikroorganizmów o dużym zróżnicowaniu gatunkowym. Znakomita większość z nich należy do naturalnej, fizjologicznej mikroflory człowieka (około 1000 gatunków bakterii traktuje nasz organizm jako naturalne środowisko życia). Dominującym drobnoustrojem skóry są bakterie *Staphylococcus epidermidis*, tworzące do 90% całej bytującej tu populacji mikroorganizmów, *Staphylococcus aureus*, których nosicielstwo w zdrowej populacji sięga 20%, maczugowce, paciorkowce i laseczki tlenowe oraz grzyby drożdżoidalne. Powierzchnię błon śluzowych górnych dróg oddechowych człowieka zasiedlają najczęściej gronkowce (*Staphylococcus pneumoniae*), paciorkowce (*Streptococcus salivarius*), maczugowce (*Corynebacterium* spp.) i meningokoki (*Neisseria* spp.).

Ważnym źródłem cząstek biologicznych są też materiały gromadzone i magazynowane w pomieszczeniach. Książki i dokumenty są rezerwarem wielu substancji odżywczych (np. celulozy, substancji białkowych), stymulujących wzrost określonej grupy mikroorganizmów. Wśród grzybów są to mikroorganizmy głównie z gatunków *Alternaria*, *Aspergillus*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Scopularopsis* czy *Trichoderma* [7]. Bakterie występują na papierze raczej rzadko. Ich liczebność znacznie wzrasta dopiero w przypadkach długotrwałych zalań księgozbiorów (np. powodzie) oraz podczas zbyt powolnego osuszania tych materiałów. Takie warunki sprzyjają rozwojowi bakterii z rodzajów *Cellfaliculata*, *Cellvibrio* i *Cytophaga* oraz promieniowców z rodzaju *Streptomyces*.

Istotnym źródłem SCB w przemysłowym środowisku wewnętrznym są procesy technologiczne, np. oczyszczanie ścieków, zbieranie i przetwarzanie odpadów, pozyskiwanie i przetwarzanie biomasy. Np. w ściekach komunalnych obok drobnoustrojów typowo środowiskowych występują gatunki patogenne z rodzajów *Streptococcus*, *Helicobacter*, *Legionella* lub *Salmonella*.

SCB mogą występować w odpadach komunalnych, a w konsekwencji uwalniane do powietrza, wody i gleby. Liczbę gatunków bakterii mogących występować przy pracach z odpadami ocenia się na ponad 100. Z punktu widzenia potencjalnych zagrożeń dla zdrowia uwagę należy zwrócić na liczne Gram-ujemne pałeczki jelitowe z rodziny *Enterobacteriaceae*, Gram-dodatnie ziarniaki kałowe z rodzaju *Enterococcus*, a także przedstawicieli gronkowców. Do najczęściej spotykanych w odpadach grzybów pleśniowych należą rodzaje *Aspergillus* oraz *Penicillium* [5].

Świeża biomasa zawiera ok. 2000 gatunków bakterii i grzybów. Istotne zagrożenie stanowi endotoksyna bakteryjna wytwarzana przez Gram-

Tabela 1. Materiały konstrukcyjno-wykończeniowe i mikroorganizmy odpowiedzialne za ich biodeteriorację
Table 1. Selected construction and finishing materials and microorganisms responsible for their biodeterioration

Rodzaj materiału	Drobnoustroje odpowiedzialne za biodeteriorację
Wyroby z drewna i papieru (tapety, płyty gipsowo-kartonowe)	Bakterie <i>Bacillus</i> , <i>Cellulomonas</i> , <i>Streptomyces</i> ; grzyby <i>Fusarium</i> , <i>Penicillium</i>
Mineralne materiały budowlane (kamień, beton, cegła, szkło)	Bakterie <i>Aeromonas</i> , <i>Artrobacter</i> , <i>Brevibacterium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Nitrobacter</i> , <i>Novcardia</i> ; grzyby <i>Aspergillus</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Penicillium</i>
Metale i stopy	Bakterie siarkowe <i>Thiobacillus</i> , <i>Desulfovibrio</i> i <i>Desulfotomaculum</i> oraz żelazowe <i>Gallionella</i> i <i>Sphaerotilus</i>
Materiały i powłoki malarskie	Bakterie <i>Flavobacterium</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Streptomyces</i> , grzyby <i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Penicillium</i>
Materiały elektroizolacyjne	Bakterie <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; grzyby <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Geotrichum candidum</i> ; <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> i <i>Ulocladium</i>

Tabela 2. Elementy instalacji wentylacyjnych i mikroorganizmy je zasiedlające
Table 2. Selected elements of ventilation systems and microorganisms responsible for their colonization

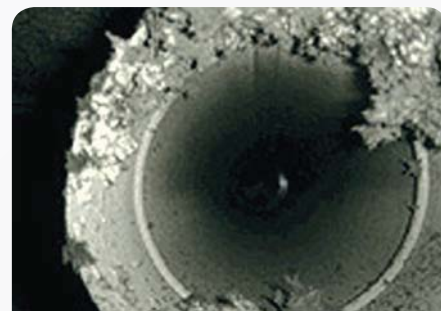
Elementy instalacji	Rodzaj mikroorganizmu
Powierzchnie przewodów	<i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Rhodotruła</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Staphylococcus</i>
Chłodnice powietrza	<i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Penicillium</i>
Odkraplacze, odwadniacze, zasyfonowania	<i>Legionella</i> , <i>Thermoactinomyces</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Acremonium</i>
Filtry	<i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Acremonium</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Pseudomonas</i>
Wieże chłodnicze	<i>Legionella</i> , <i>Thermoactinomyces</i> , <i>Acremonium</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Aspergillus</i>



Fot. 1. Anemostat nawiewny zanieczyszczony cząstkami aerozolu ziarnistego i bioaerozoli
Photo 1. Supply air diffuser contaminated by aerosol particle matter and bioaerosols

-ujemne pałeczki z rodziny *Enterobacteriaceae* oraz z rodzajów *Pseudomonas* spp. i *Alcaligenes* spp. W pyłe organicznym powstającym podczas przetwarzania biomasy występują termofile i mezofile promieniowce. Poważnym zagrożeniem w przetwórstwie biomasy są również grzyby pleśniowe z rodzajów *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alteranria*, *Scopulariopsis* i *Trichoderma*. Mikroorganizmy te mogą powodować wystąpienie wielu niekorzystnych efektów zdrowotnych (reakcje alergiczne i toksyczne, infekcje), [6].

Mikroorganizmy rozwijające się na materiałach konstrukcyjnych budynków powodują zmiany ich właściwości fizycznych, osłabiając ich cechy użytkowe (np. wytrzymałość na rozciąganie, kruszenie, rozwarstwianie). Powodują również zagrożenie dla zdrowia osób pracujących w ich otoczeniu emitując do powietrza alergeny, endotoksyny, glukany i mikitoksyny [1]. W budynkach, w których wystąpiły zniszczenia wodne powodując ich trwałe zawilgocenie, spotyka się gatunki z rodzajów *Stachybotrys*, *Chaetomium*, *Fusarium*, *Trichoderma* i *Paecilomyces*. Liczba zarodników grzybów wykazuje sezonowe wahania zarówno w powietrzu atmosferycznym, jak i w pomieszczeniach zamkniętych. W lecie następuje wzrost stężenia zarodników grzybów, w zimie spadek. W tabeli 1. przedstawiono wybrane materiały konstrukcyjno-wykończeniowe, stosowane



Fot. 2. Pył osiadły w kanałach wentylacyjnych
Photo 2. Settled dust in ventilation ducts

w budynkach oraz rodzaje mikroorganizmów, które powodują ich biodeteriorację [8, 9].

Powietrze atmosferyczne transportuje dużą liczbę cząstek biologicznych należących do niechorobotwórczej flory saprofitycznej. Są to głównie zarodniki, najczęściej grzybów pleśniowych. Cząstki biologiczne przedostają się do atmosfery w wyniku usuwania ich z powierzchni roślin i gleby, na skutek działania wiatru lub procesu termicznej konwekcji, po ich samoistnej lub wymuszonej opadem deszczu emisji z naturalnych zbiorników wodnych oraz na skutek składowania i przetwarzania odpadów stałych i ciekłych [10]. Powietrze atmosferyczne może przenikać do pomieszczeń w sposób niekontrolowany przez nieszczelności koperty budynku oraz w sposób kontrolowany – przez systemy wentylacyjne.

Niewłaściwie konserwowana instalacja wentylacyjna (np. na skutek użycia filtrów o zbyt niskiej sprawności wychwytu cząstek, ich długotrwałej eksploatacji, braku systematycznego czyszczenia lub dezynfekcji) może powodować dodatkowe zanieczyszczenie pomieszczeń w wyniku ich wtórnego pylenia [11, 12]. Część zanieczyszczeń osadzających się na wewnętrznych powierzchniach przewodów wentylacyjnych (fot. 1 i 2.), wraz ze strumieniem płynącego powietrza może ulec rozproszaniu zarówno w innych elementach instalacji, jak i obsługiwanych przez nią pomieszczeniach. W tabeli 2. przedstawiono wybrane elementy instalacji wentylacyjnych i występujące w nich mikroorganizmy [13].

Oddziaływanie czynników biologicznych na zdrowie człowieka

Większość mikroorganizmów nie stanowi zagrożenia zdrowotnego w normalnych warunkach środowiskowych (tj. przy niskich stężeniach bioaerozolu), jednak część z nich wykazuje właściwości chorobotwórcze, alergizujące lub toksyczne. Ich obecność w środowisku pracy może prowadzić do różnorodnych skutków zdrowotnych, poczynając od prostych podrażnień i dolegliwości, przez reakcje alergiczne, aż do wystąpienia infekcji, chorób zakaźnych czy reakcji toksycznych [14].

Szacuje się, że ok. 30% problemów zdrowotnych związanych z jakością powietrza wewnętrznego wiąże się z narażeniem na grzyby pleśniowe. Alergeny grzybów są główną przyczyną chorób o podłożu atopowym. Około 100 gatunków grzybów jest łączonych przyczynowo z symptomami związanymi z chorobami alergicznymi układu oddechowego [15]. Dotyczy to najczęściej takich rodzajów grzybów, jak *Alternaria* (fot. 3.), *Cladosporium*, *Aspergillus* (fot. 4.), *Penicillium*, *Trichoderma* i *Mucor*.

W powietrzu wewnętrznym może występować kilkadziesiąt gatunków bakterii, jak chociażby gatunki z rodzaju *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Micrococcus* i *Streptomyces*. Większość z nich nie stanowi zagrożenia zdrowia człowieka przy niskich stężeniach w bioaerozolu, jednak część wykazuje właściwości alergizujące. Z występowaniem i rozwojem niektórych gatunków bakterii wiąże się też obecność w bioaerozolu cząstek pochodzenia drobnoustrojowego o działaniu immunotoksycznym, takich jak np. endotoksyna bakteryjna. Długotrwałe narażenie ludzi na kontakt z bakteriami Gram-ujemnymi będącymi źródłem endotoksyn może być przyczyną chronicznego zapalenia oskrzeli, alergicznego całorocznego nieżyty nosa, astmy, bólu głowy, stawów, kaszlu, objawów grypopodobnych czy duszności [16].

Ze schorzeniami powodowanymi przez urządzenia klimatyzacyjne często kojarzone są Gram-ujemne pałeczki *Legionella pneumophila*, będące czynnikiem etiologicznym legionellozy (choroby legionistów i gorączki Pontiac). Ta pierwsza ma postać ciężkiego, szybko postępującego zapalenia płuc, któremu towarzyszą: gorączką przekraczającą 40 °C, dreszcze, złe samopoczucie, suchy kaszel, biegunka, objawy neurologiczne oraz uszkodzenia wątroby, bradykardia itp., natomiast gorączka Pontiac



Fot. 3. Kolonie *Alternaria alternata* na podłożu MEA
Photo 3. *Alternaria alternata* colonies on MEA medium

charakteryzuje się znacznie łagodniejszym, grypopodobnym przebiegiem.

Istotnym źródłem alergenów w środowisku wewnętrznym są roztocza, rozwijające się w kurzu domowym lub na zawilgoconych ścianach. Czynnikiem alergennym są ich odchody zawierające związki białkowe. Jak wynika z danych epidemiologicznych, w latach 90. ubiegłego stulecia ponad 100 milionów osób na świecie miało kłopoty zdrowotne, których przyczyną było narażenie na roztocze kurzu domowego, a około 10% populacji cierpi z powodu uczulenia na ich alergeny. Mogą one być również przyczyną rozwoju szeregu takich chorób, jak: astma oskrzelowa, alergiczny nieżyt nosa, zapalenie spojówek, swędzenie lub pokrzywka na skórze.

Podsumowanie

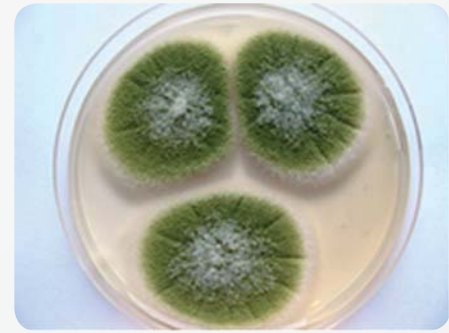
Jakość powietrza wewnętrznego od wielu lat stanowi przedmiot szczególnego zainteresowania naukowców. W dokumencie Światowej Organizacji Zdrowia pt. „Prawo do zdrowego powietrza wewnętrznego” stwierdzono, że właściwa jego jakość jest wyznacznikiem zdrowia i dobrego samopoczucia ludzi. Użytkownicy pomieszczeń powinni mieć wiedzę na temat ewentualnych zagrożeń dla zdrowia, wynikających z wdychania zanieczyszczonego powietrza.

Warunkiem zachowania prawidłowego stanu higienicznego wnętrza, a co za tym idzie komfortu zdrowotnego ludzi, jest określenie narażenia na szkodliwe czynniki mikrobiologiczne, które stanowią stały element składowy powietrza oraz ograniczenie ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na SCB. Przy ograniczaniu ryzyka zawodowego na SCB zaleca się postępowanie zgodnie z zasadą „STOP”, tj. S (*substitution*) – zastąpienie, T (*technical safety*) – bezpieczeństwo techniczne, O (*organisation*) – środki organizacyjne oraz P (*personal safety*) – środki ochrony indywidualnej.

Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki w szczegółowy sposób opisuje środki sposoby ochrony pracowników zawodowo narażonych na czynniki biologiczne [17].

PIŚMIENICTWO

- [1] WHO – Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and mould. World Health Organization, Regional Office for Europe. Copenhagen 2009
- [2] Gutarowska B. Przegląd metod oceny zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza. „Problemy jakości powietrza



Fot. 4. Kolonie *Aspergillus flavus* na podłożu MEA
Photo 4. Culture of *Aspergillus flavus* on MEA medium

wewnętrznego w Polsce 2001”, Wyd. Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002

- [3] Zyska B. J. *Zagrożenia biologiczne w budynku*. Arkady, Warszawa 1999
- [4] Buczyńska A., Cyprowski M., Piotrowska M., Szadkowska-Stańczyk I. *Grzyby pleśniowe w powietrzu pomieszczeń biurowych – wyniki interwencji środowiskowej*, „Medycyna Pracy” 2007, 58
- [5] Buczyńska A., Cyprowski M., Szadkowska-Stańczyk I. *Czynniki biologiczne, szkodliwe dla zdrowia występujące w powietrzu na terenie składowisk odpadów komunalnych*, „Medycyna Pracy” 2006, 57, 531-535
- [6] M. Gołofit-Szymczak, A. Ławniczek-Wałczyk *Biomasa jako źródło zagrożeń biologicznych*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2011, 483, 12:17-19
- [7] Wlazło A., Górny R.L., Złotkowska R., Ławniczek A., Łudzeń-Izbińska B., Harkawy A., Anczyk E. *Narażenie pracowników na wybrane szkodliwe czynniki biologiczne w bibliotekach województwa śląskiego*, „Medycyna Pracy” 2008, 59: 159-170
- [8] *Wilgoć, pleśń i grzyby w budynkach*. Charkowska A., Mijkowski M., Sowa J. (red.). Wyd. Verlag-Dashofer, Warszawa 2005
- [9] Ważny J., Karyś J. *Ochrona budynków przed korozją biologiczną*. Arkady, Warszawa 2001
- [10] Kulkarni P., Baron P.A., Willeke K. (red.) *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. John Wiley and Sons, Inc., New York 2011
- [11] Bogdan A., Charkowska A. *Instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne – kontrola stanu higienicznego* (1). „Bezpieczeństwo Pracy” 2008, 442-443, 7-8:36-40
- [12] Charkowska A., Bogdan A. *Instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne – metody czyszczenia i dezynfekcji* (2). „Bezpieczeństwo Pracy” 2008, 445, 10:16-17
- [13] Charkowska A. (red.) *Zanieczyszczenia w instalacjach klimatyzacyjnych i metody ich usuwania*. IPPU Masta, Gdańsk 2003
- [14] Sykes P., Jones K., Wildsmith J.D. *Managing the potential public health risks from bioaerosol liberation at commercial composting sites in the UK: An analysis of the evidence base*. „Resources, Conservation and Recycling” 2007, 52: 410-424
- [15] Gołofit-Szymczak M. *Określenie narażenia na aerozol bakteryjny i grzybowy w środowisku pracy pomieszczeń biurowych z uwzględnieniem systemu wentylacyjnego budynku*. Rozprawa doktorska, 2012
- [16] Ławniczek-Wałczyk A., Górny R.L. *Endotoxins and -glucans as markers of microbiological contamination – characteristics, detection and environmental exposure*. „Annals of Agricultural and Environmental Medicine” 2010, 17: 193-208
- [17] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki (DzU 2005, nr 81, poz. 716 ze zm.: DzU 2008, nr 48, poz. 288)

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.