

Michał Michałkiewicz

Powstawanie, przenoszenie i szkodliwość bioaerozoli emitowanych do powietrza atmosferycznego

Problematyka zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego ma coraz większe znaczenie we współczesnym świecie. W ramach wielu dziedzin nauki wyodrębniła się nawet aerobiologia, która jest interdyscyplinarną nauką zajmującą się badaniem mikroorganizmów oraz materiałów biologicznych związanych z powietrzem atmosferycznym, w tym ich uwalnianiem do atmosfery, transportem, rozprzestrzenianiem, depozycją, a także wpływem na rośliny, zwierzęta i ludzi. Do najczęściej analizowanych cząstek biologicznych w powietrzu należą bakterie, grzyby, wirusy, pyłki roślin, toksyny i alergeny, gdyż stanowią one największą część bioaerozolu znajdującego się w powietrzu. Odgrywają one szczególną rolę w wyjaśnieniu etiologii, patogenez i mechanizmów szerzenia się wielu epidemii, w których ważną rolę odgrywa powietrze, a szczególnie bioaerozole, mogące zawierać drobnoustroje chorobotwórcze lub substancje o działaniu alergizującym i toksycznym.

W XX wieku zanotowano gwałtowny wzrost zainteresowań aerozolami biologicznymi, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie zdrowia ludzi, zwierząt i roślin, o czym świadczy liczba publikacji i cytowań prac naukowych zajmujących się cząstkami biologicznymi zawieszonymi w powietrzu. Problematyka bioaerozoli dotyczy wielu dziedzin nauki, począwszy od medycyny, przez botanikę, zoologię, inżynierię środowiska, ekologię, a skończywszy na typowej mikrobiologii. Wiąże się to między innymi z tym, że aerozole biologiczne mogą mieć negatywny wpływ na zdrowie ludzi, są związane z licznymi chorobami zakaźnymi, wywołują reakcje toksyczne i alergiczne, astmę, a nawet choroby nowotworowe [1–6]. Najbardziej udokumentowane są ujemne skutki wpływu bioaerozoli na układ oddechowy u ludzi [7–10]. Wśród aerozoli emitowanych do atmosfery można wyróżnić aerozole pierwotne i wtórne. Pierwotne cząstki aerozolu są emitowane do atmosfery bezpośrednio z materiału źródłowego, a cząstki wtórne powstają z zanieczyszczeń pierwotnych w wyniku licznych przemian fizycznych lub chemicznych i są utworzone w powietrzu między innymi przez kondensację prekursorów gazowych [5, 11–14]. Ze względu na źródło emisji, aerozole mogą być pochodzenia naturalnego (biogenego) i antropogenicznego. Najbardziej istotnymi naturalnymi źródłami pierwotnych cząstek aerozoli są emisje rozprysków wód, w tym morskich, procesy uwalniania pyłu mineralnego z gleb i skał na skutek erozji, wybuchy

wulkanów, procesy spalania biomasy oraz aerozole biologiczne. W skład bioaerozoli mogą wchodzić cząstki stałe i ciekłe uwalniane do atmosfery z roślin i zwierząt oraz mikroorganizmy. Cząstki te składają się z wosków, pyłków, fragmentów liści, glonów, nasion, sierści, różnorodnych drobnoustrojów, zarodników, szczątków organicznych i fragmentów komórek. Ze względu na różnorodność pochodzenia, cząstki bioaerozolu wykazują dużą różnorodność kształtu i wielkości – od około 0,001 μm do co najmniej 250 μm . Ilość i rodzaj bioaerozoli może się znacznie różnić w środowisku i zależy między innymi od sezonowości, lokalizacji i wysokości. Szacuje się, że średni roczny globalny strumień emisji pierwotnych cząstek aerozolu biologicznego do atmosfery wynosi około 1000 Mt, pyłów mineralnych 2000 Mt, a cząstek soli morskiej 3300 Mt (1 Mt = 10^{12} g) [15]. Bioaerozol może czasami stanowić do 30% objętości aerozolu w danej lokalizacji. Różne rodzaje bioaerozoli są szeroko rozpowszechnione i zajmują prawie całą troposferę i mogą uczestniczyć w procesach tworzenia chmur i cząstek lodu. Biorą także udział w rozprzestrzenianiu się patogenów i łatwo przenikają do układu oddechowego ludzi i zwierząt.

Aerozole wtórne są produktami powstałymi na skutek przemian fizycznych lub chemicznych, zachodzących między składnikami atmosfery a prekursorami jej zanieczyszczeń. Na skutek kondensacji gazów mogą się one skraplać na cząstkach aerozolu, zwiększając tym samym ich masę. Stężenie masowe cząstek aerozolu może się znacznie różnić w zależności od wilgotności względnej powietrza. Aerozol wtórny może często wykazywać większą szkodliwość niż aerozol pierwotny, gdyż w różne reakcje mogą wchodzić także pyły, które wcześniej opadły na powierzchnię ziemi [14].

W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące bioaerozoli, ich wielkości i składu, możliwości powstawania i przenoszenia w atmosferze, ze szczególnym uwzględnieniem emisji aerozoli z oczyszczalni ścieków. Ponieważ obiekty komunalne są antropogenicznym źródłem emisji szkodliwych bioaerozoli, dlatego przedstawiono rodzaje patogenów, które mogą wpływać na zdrowie pracowników oczyszczalni oraz mieszkańców okolicznych terenów. Scharakteryzowano również podstawowe przepisy dotyczące bioaerozoli, metod ich badania oraz ochrony pracowników przed negatywnym wpływem tych substancji na zdrowie. Mając świadomość, że technologicznie stosowane w procesie oczyszczania ścieków przyczyniają się do mikrobiologicznego skażenia powietrza atmosferycznego, należy stosować wszelkie możliwe sposoby ograniczenia emisji drobnoustrojów do otaczającego środowiska.

Charakterystyka bioaerozolu

Aerazol biologiczny, czyli tak zwany bioaerazol, jest układem koloidalnym, w którym fazą rozproszoną są drobnoustroje i ich metabolity oraz materiał roślinny i zwierzęcy, występujący w postaci drobnych kropli lub cząstek stałych, a fazą rozpraszającą stanowi powietrze atmosferyczne [14, 16–18]. Średnica cząstek bioaerozolu wynosi najczęściej od kilku nanometrów do 100 μm, przy czym dolną granicą są wielkości cząstek wirusów lub małe fragmenty komórek, a górną granicą na przykład struktury pyłków kwiatowych, cząstki detrytus lub nasiona. Fazę rozproszoną bioaerozolu najczęściej tworzą:

- wirusy (0,01÷0,3 μm)
- bakterie (0,1÷20 μm),
- glony (1÷100 μm),
- zarodniki grzybów, mchów i porostów (1÷100 μm),
- pyłki kwiatów (10÷100 μm),
- detrytus, nasiona i owoce (10÷1000 μm).

Cząstki aerozolu biologicznego obejmują stałe frakcje zawieszane w powietrzu i pochodzące od organizmów żywych, w tym drobnoustroje i nienaruszone lub rozdrobnione fragmenty komórkowe lub tkankowe zawierające materiał biologiczny, taki jak resztki roślin, czy złuszczone naskórek zwierzęcy. W skład organizmów lub struktur żywych występujących w postaci bioaerozolu wchodzi zarówno formy wegetatywne, jak i przetrwalne, między innymi bakterie [20–25], grzyby [26–36], porosty i protisty (w tym glony) [24, 37–43], pyłki roślin [43–47], archeowce [48–51], zarodniki, przetrwalniki i nasiona [29, 30] oraz wirusy [4, 52–55]. Stałe fragmenty materiału biologicznego lub wydzieliny organizmów reprezentowane są natomiast przez rozdrobnione szczątki roślinne i zwierzęce (detrytus), fragmenty drobnoustrojów i odchodów, brochosomy, złuszczenia naskórek, włosy i sierść, a także metabolity organizmów, między innymi toksyny czy glukany [3, 40, 42, 56–69].

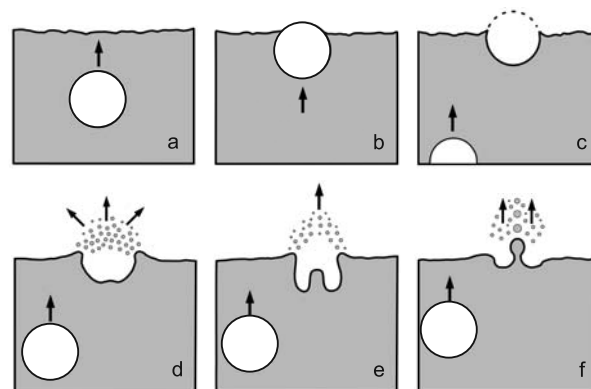
Małe cząstki bioaerozolu mogą być zawieszane w powietrzu przez długi czas, natomiast większe cząstki materiału biologicznego mogą być okresowo unoszone w powietrzu przez wiatr, lecz ze względu na większą masę stosunkowo szybko opadają na podłoże. Z tego powodu niektórzy badacze nie zaliczają tych struktur do typowych cząstek aerozolu atmosferycznego. Mając na uwadze fakt, że w skład aerozolu wchodzi zarówno żywe komórki, jak i fragmenty substancji organicznych, należy podczas poboru próbek powietrza i identyfikacji bioaerozolu stosować odpowiednie techniki i procedury badawcze. Wielkość poszczególnych frakcji bioaerozolu, ich właściwości sedymentacyjne, trwałość czy przeżywalność wpływają między innymi na możliwość i skuteczność wychwytywania struktur zawartych w powietrzu, a wybór odpowiednich metod diagnostycznych stanowi podstawę dokładnego i szczegółowego określenia konkretnych składników bioaerozolu.

Powstawanie i rozprzestrzenianie się bioaerozolu w powietrzu

Mikroorganizmy występujące w powietrzu łatwo osadzają się na kropelkach substancji organicznych lub nieorganicznych obecnych w powietrzu, dlatego bioaerozole rzadko spotykane są w postaci czystego materiału biologicznego. Skład i stężenie fazy rozproszonej w bioaerozolu zależy od wielu czynników, takich jak źródło i rodzaj aerozolu, wielkość emitowanych cząstek, warunki klimatyczne, w tym temperatura, wilgotność i wysokość opadów

atmosferycznych, pora roku, działanie wiatru, ukształtowanie terenu oraz obecność lub brak szaty roślinnej. Najlepsze warunki do przenoszenia w bioaerozolu mają cząstki małe, o wielkości poniżej 20 μm. Szczególnie niebezpieczne dla organizmu człowieka są jednak cząstki o średnicy mniejszej niż 5 μm, gdyż wnikają one najgłębiej do dróg oddechowych, natomiast większe zatrzymywane są w jamie nosowo-gardłowej lub w górnych odcinkach układu oddechowego [17, 56, 58, 60, 67, 70–76].

Proces powstawania aerozolu i bioaerozolu, przedstawiony przez autorów pracy [14], pokazuje mechanizm powstawania aerozolu pierwotnego na przykładzie rozpryskiwania tworzących się kropli wód morskich (rys. 1).



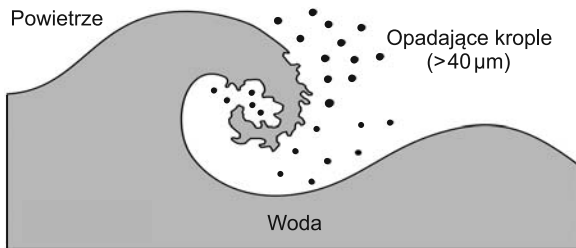
Rys. 1. Schemat sekwencyjnych faz przemian pęcherzyka powietrza w cieczy (wg [14], zmodyfikowany)

Fig. 1. Schematic diagram of sequential phases of an air bubble alterations in a liquid (according to [14], modified)

Obecne w toni wodnej pęcherzyki gazu, powstające w procesach fizycznych, chemicznych lub biologicznych, pod wpływem siły wyporu unoszą się ku powierzchni cieczy, a następnie rozpryskują na granicy wody i powietrza. Na skutek przemieszczania się pęcherzyków do warstwy granicznej (a) woda-powietrze (błona powierzchniowa, tak zwany film), docierają one do mikrowarstwy powierzchni wody (b, c), gdzie następuje ich pęknięcie, w wyniku czego z cieczy otaczającej pęcherzyki powstają drobne krople o średnicy 5÷30 μm (d), które następnie zostają uniesione do powietrza i odparowują, pozostawiając w nim cząstki soli i inne materiały (e). Jednocześnie niektóre pęcherzyki tworzą kilka (1÷5) dużych kropli (o średnicy około 15% pękającego pęcherzyka powietrza), które również zostają uniesione do powietrza (f). Czas pomiędzy fazą rozpoczęcia pęknięcia pęcherzyków (c) a wyniesieniem kropli cieczy do powietrza (f) wynosi około 2 ms. W wyniku tych procesów możliwe jest wyniesienie do powietrza drobnych cząstek o średnicy 0,05÷10 μm, które znajdują się na błonie pękających pęcherzyków powietrza i filmu. Największe krople najczęściej gwałtownie opadają na podłoże w obrębie obszaru ich tworzenia, podczas gdy małe cząstki aerozolu, uformowane w powierzchniowych warstwach cieczy, odgrywają istotną rolę w powstawaniu aerozolu wodnego na dużą skalę. Bardzo drobne cząstki pochodzące z pękających pęcherzyków mają małe rozmiary, w przybliżeniu 0,1÷1,0 μm, a zatem mogą długo przebywać w powietrzu nawet w dużym zagęszczeniu i są przenoszone wraz z wiatrem na znaczne odległości [14].

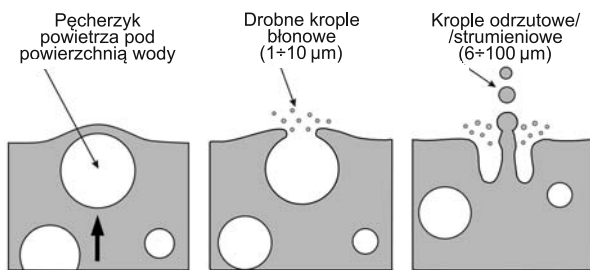
Bioaerozole wytwarzane są w wyniku wielu procesów obejmujących zarówno pęknięcie pęcherzyków powietrza w cieczy, jak i procesy erozji, rozproszenie i mechaniczne oddziaływanie między powierzchniami. Drobnoustroje w bioaerozolu mogą występować w postaci pojedynczych

komórek, a także tworzyć grupy komórek przymocowanych do innego materiału, na przykład cząstek kurzu, pyłu, detrytusy czy biofilmu. Głównym źródłem bioaerozoli są wody otwarte, gdyż pokrywają one około 70% powierzchni Ziemi. Najczęściej wyróżnia się trzy rodzaje kropli utworzonych z wody – krople powstałe na skutek opadania strumienia cieczy (rys. 2), krople filmu (błonowe) oraz krople odrzutowe (rys. 3) [19].



Rys. 2. Powstawanie aerozolu w wodzie (wg [19], zmodyfikowane)

Fig. 2. Formation of an aerosol in water (according to [19], modified)

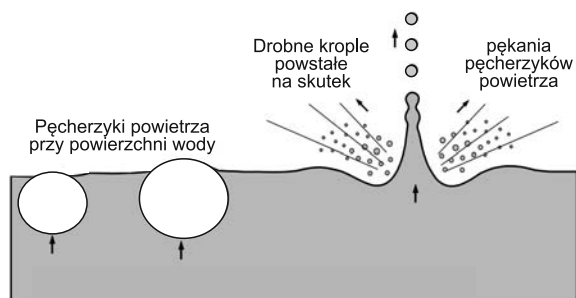


Rys. 3. Powstawanie aerozolu w wodzie (wg [19], zmodyfikowane).

Fig. 3. Formation of an aerosol in water (according to [19], modified)

Opadające krople, mające zazwyczaj średnicę około $40\ \mu\text{m}$, są odrywane od grzbietów fal, gdy prędkość wiatru wynosi $7\div 11\ \text{m/s}$, natomiast krople filmu i odrzutowe (strumieniowe) pochodzą bezpośrednio z pęcherzyków powietrza. Drobne krople błonowe, zwykle o średnicy $1\div 10\ \mu\text{m}$, są uwalniane wówczas, gdy cienka warstwa cieczy występująca na pękającym pęcherzyku powietrza spowoduje ich przeniesienie do powietrza, natomiast podczas opadania strumienia cieczy i pękania pęcherzyków powietrza tworzą się również większe (o średnicy $6\div 100\ \mu\text{m}$ lub około 10% początkowego pęcherzyka) krople odrzutowe, które są wyrzucane do góry. Głównym źródłem pęcherzyków są fale, opady atmosferyczne lub opadające duże cząstki stałe.

Zjawisko wydostawania się drobnoustrojów z pękających pęcherzyków powietrza zostało także opisane i zilustrowane w pracach [60, 77] (rys. 4).



Rys. 4. Zjawisko pęknięcia (parowania) pęcherzyka powietrza na granicy faz ciecz-powietrze (wg [60, 77], zmodyfikowane)

Fig 4. The bursting phenomenon (evaporation) of an air bubble on the liquid-air interface (according to [60, 77], modified)

Czynnikami wpływającymi na przenoszenie bioaerozoli jest ich gęstość, kształt i ładunek elektryczny. Zazwyczaj gęstość materiału biologicznego wynosi $1,0\div 1,5\ \text{g/cm}^3$, lecz w przypadku mieszaniny cząstek bioaerozolu z innymi substancjami, na przykład pyłem mineralnym lub solą morską, gęstość ta może być większa. Kształt cząstek bioaerozolu może się zmieniać od pojedynczych komórek aerodynamicznych, wydłużonych, do łańcuchów i złożonych agregatów. Ładunek elektryczny bioaerozolu jest najczęściej obojętny. Ważną cechą bioaerozolu jest jego żywotność, czyli zdolność do przetrwania i wzrastania. Wiele bakterii ma systemy chroniące je przed wyschnięciem, działaniem promieniowania nadfioletowego, temperatury, ciśnienia, tlenu oraz niedostatkiem wody i substancji odżywczych. Na przeżywalność wpływają ich zdolności do tworzenia form przetrwalnych, pigmentacja, wytwarzanie śluzowej otoczki i biofilmu. Najczęstszą i najbardziej skuteczną drogą przenoszenia bioaerozolu jest transport przy udziale wiatru [5, 19, 50].

Źródłem aerozolu są czynniki naturalne i antropogeniczne. Cząstki wyniesionego aerozolu mogą ulegać bezpośredniej sedymentacji lub często pozostają przez kilka tygodni w atmosferze, zanim opadną na podłoże. W tym czasie – wraz z wiatrem – mogą być przenoszone na bardzo znaczne odległości, lecz mogą być także przekształcane i inaktywowane między innymi na skutek procesów starzenia fizycznego i chemicznego. Przekształcanie takie zachodzi w chmurach i może następować przez aglomerację, odparowanie, kondensację i restrukturyzację. Podczas aglomeracji cząstki aerozolu zderzają się i tworzą większe agregaty, które mogą ulegać szybszej depozycji. Restrukturyzacja może nastąpić w wyniku wychwytywania wody i powstawania kropli, co jest szczególnie możliwe w powietrzu o dużej wilgotności. Zachodzi ona także na skutek przemian chemicznych i fizycznych w atmosferze (utlenianie, nitrowanie, hydroliza, fotoliza, działanie promieni nadfioletowych). Pomimo takiego stresu środowiskowego zachodzącego w powietrzu jest możliwe, że wiele drobnoustrojów pozostaje aktywnych metabolicznie, rozwijają się i utrzymują zdolność do reprodukcji, gdyż mają specyficzne mechanizmy ochronne [19, 78, 79]. Depozycja, czyli opadanie na podłoże, polega na usuwaniu z powietrza cząstek suchych i mokrych. Mokra depozycja może rozpoczynać się w chmurach, a następnie wraz z opadami atmosferycznymi (deszcz, śnieg) cząstki aerozolu opadają na podłoże. W przypadku suchej depozycji cząstki mogą się zderzać, przez co zwiększają swoją masę i opadają na podłoże w wyniku sedymentacji, dyfuzji, przechwytywania czy burzliwych wiatrów. Depozycja cząstek większych niż $0,5\ \mu\text{m}$ (jak większość bioaerozoli) zachodzi najczęściej na skutek osadzania grawitacyjnego. Prędkość tego procesu jest proporcjonalna do kwadratu średnicy cząstki, a tym samym wzrasta wraz z jej wielkością. Cząstki mniejsze niż $0,5\ \mu\text{m}$, wykonujące ruchy Browna, poruszają się na zasadzie dyfuzji, której szybkość jest w przybliżeniu proporcjonalna do odwrotności kwadratu średnicy cząstki. Duże cząstki mogą być porywane przez strumienie powietrza i opadają na podłoże wraz z uderzeniem podmuchu wiatru. Cząstki w zakresie wielkości $0,1\div 1,0\ \mu\text{m}$ najslabiej opadają i najdłużej utrzymują się w powietrzu. Biorąc pod uwagę ukształtowanie niektórych bioaerozoli (na przykład pyłki, zarodniki grzybów) należy pamiętać, że mogą one mieć nie tylko aerodynamiczny kształt, lecz często są wyposażone w komory powietrzne, które ułatwiają im unoszenie się w powietrzu i transport na duże odległości [19].

Zakładając, że cząstka aerozolu ma gęstość $1,0 \text{ g/cm}^3$, to – zgodnie z prawem Stokesa – prędkość opadania cząstki kulistej o średnicy $0,1 \mu\text{m}$ w nieruchomym powietrzu wynosi $0,3 \text{ cm/h}$, o średnicy $1,0 \mu\text{m}$ – 13 cm/h , a o średnicy $40 \mu\text{m}$ – 1800 cm/h . Zatem biorąc pod uwagę wielkość cząstek bioaerozolu, większe cząstki w powietrzu utrzymują się stosunkowo krótko i są usuwane z powietrza przez sedymentację, chociaż mogą być także ponownie uniesione do powietrza przez wiatr. Cząstki o bardzo małych rozmiarach (submikronowe) mogą natomiast utrzymywać się w powietrzu przez kilka dób i na ogół są usuwane z powietrza na skutek opadów atmosferycznych lub opadania wraz z innymi, większymi cząstkami. Cząstki bioaerozolu występujące w powietrzu mogą składać się z pojedynczych komórek lub tworzyć agregaty złożone na przykład z wielu bakterii. Organizmy wchodzące w skład bioaerozolu mogą być również związane z cząstkami kurzu lub kropelkami cieczy, na przykład ścieków [80].

Bioaerozol emitowany z obiektów komunalnych

Potencjalnym źródłem szkodliwego bioaerozolu są między innymi obiekty komunalne, takie jak oczyszczalnie ścieków czy składowiska odpadów. Bioaerozol unoszący się w powietrzu wokół oczyszczalni ścieków jest następstwem emisji do atmosfery składników fazy rozproszonej obecnej w ściekach dopływających do oczyszczalni i na kolejnych etapach oczyszczania ścieków, a także w skratkach, piasku czy osadach ściekowych oraz w wodach powierzchniowych, do których odprowadzane są ścieki oczyszczone. Na składowiskach odpadów komunalnych bioaerozol powstaje zarówno podczas transportu, segregacji, wysypywania, składowania, wałowania, zagęszczania, wykonywania warstwy izolacyjnej, a także rekultywacji składowiska.

Szczególnie niebezpieczne dla zdrowia ludzi są składniki fazy rozproszonej emitowane ze ścieków na różnych etapach ich oczyszczania, zwłaszcza podczas ich turbulencji. Ścieki, zwłaszcza bytowo-gospodarcze, zawierają znaczne ilości patogennych wirusów, bakterii, grzybów i innych mikroorganizmów. Zdecydowana większość tych drobnoustrojów to naturalna, nieszkodliwa, symbiotyczna mikroflora, lecz występuje również mikroflora chorobotwórcza, stanowiąca potencjalne zagrożenie epidemiologiczne. Dlatego w ściekach, skratkach, piasku i osadach, a także w bioaerozolach wykrywane są patogeny, które mogą być przyczyną licznych chorób u pracowników obiektów komunalnych oraz osób mieszkających w ich bliskim sąsiedztwie.

Wśród mikroorganizmów chorobotwórczych spotyka się między innymi wirusy wywołujące schorzenia żołądkowo-jelitowe (*Reoviridae*, *Enterovirus*, *Coxsackievirus A i B*, *Hepatitis A virus*, *Astroviridae*) i choroby układu oddechowego (*Echoviruses*, *Adenoviridae*, *Parvoviridae*, *Influenzavirus*), bakterie powodujące stany zapalne jelit (*Escherichia coli*, *Citrobacter* spp., *Salmonella* spp., *Shigella dysenteriae*, *Vibrio* spp., *Yersinia enterocolitica*, *Staphylococcus aureus*, *Serratia* spp., *Enterobacter* spp., *Aerobacter* spp., *Bacillus* spp.), choroby układu oddechowego (*Klebsiella pneumoniae*, *Legionella* spp., *Streptococcus* spp., *Mycobacterium tuberculosis*, *Acinetobacter* spp., *Micrococcus* spp.) i skóry (*Clostridium perfringens*, *Proteus* spp., *Staphylococcus* spp.), a także grzyby i ich zarodniki wywołujące liczne grzybice skóry i narządów wewnętrznych oraz alergię (*Trichophyton* spp., *Rhizopus* spp.,

Mucor spp., *Aspergillus* spp., *Candida albicans*, *Geotrichum candidum*, *Cladosporium werneckii*, *Penicillium* spp., *Cladosporium* spp., *Alternaria* spp.). Ponadto występują chorobotwórcze protisty zwierzęce związane z przewodem pokarmowym człowieka (*Balantidium coli*, *Entamoeba histolytica*, *Cryptosporidium* spp., *Cyclospora cayetanensis*) oraz zwierzęta pasożytnicze, najczęściej w postaci inwazyjnych form przetrwalnych (*Ascaris lumbricoides*, *Enterobius vermicularis*, *Toxocara* spp., *Taenia solium*, *Trichuris trichiura*, *Fasciola hepatica*). Obecność tych i innych mikroorganizmów jest niebezpieczna dla zdrowia, gdyż oprócz wywoływania chorób mogą być one przyczyną alergii i astmy, mają właściwości mutagenne, działają toksycznie i immunotoksycznie na ludzi, zwierzęta i otaczające środowisko. Mogą być one również przenieszone na przyległe tereny miejskie, rekreacyjne i rolnicze, a także przedostawać się do wód powierzchniowych i podziemnych. Szkodliwe działanie powodowane jest głównie przez endotoksyny bakterii, głównie Gram-ujemnych, egzotoksyny bakterii Gram-dodatnich, liczne mikotoksyny wytwarzane przez grzyby oraz glukany występujące zarówno w ścianach komórkowych grzybów, jak i niektórych bakterii [3, 6, 10, 13, 24–26, 52, 53, 57–60, 65–67].

Powstawanie bioaerozolu w procesach technologicznych związanych z oczyszczaniem ścieków i przeróbką osadów ma najczęściej miejsce podczas burzliwego przepływu ścieków oraz ich intensywnego mieszania, a zwłaszcza napowietrzania w komorach osadu czynnego [64]. Wówczas do powietrza atmosferycznego mogą być wprowadzane żywe mikroorganizmy, w tym formy patogenne, ich formy przetrwalne oraz endotoksyny, mykotoksyny i glukany. Zanieczyszczenia te zmieszane z powietrzem tworzą bioaerozole, które dostając się do organizmów ludzi mogą powodować poważne zagrożenie zdrowia [2, 21, 22, 24]. Najłatwiej ze ścieków do bioaerozolu mogą się przedostawać mikroorganizmy obecne w powierzchniowej, cienkiej warstwie granicznej ścieki-powietrze. Ich liczebność jest tu najczęściej największa, gdyż zostają wprowadzone do warstw powierzchniowych na skutek procesów napowietrzania i mieszania ścieków w urządzeniach do ich oczyszczania [20, 60, 73, 77, 81, 82].

Mechanizmy powstawania aerozoli przedstawione w pracach [14, 19, 60, 77] można zastosować do opisu procesu emisji bioaerozolu, który zachodzi podczas napowietrzania, mieszania i przepływu ścieków na różnych etapach oczyszczania. Na przykład w bioreaktorach czy piaskownikach napowietrzanych wytworzone przez dyfuzory pęcherzyki powietrza przemieszczają się ze strefy przydennej do warstw powierzchniowych, granicznych (ścieki-powietrze). W zależności od rodzaju systemu napowietrzania (drobno-pęcherzykowe, grubo-pęcherzykowe, powierzchniowe) wielkość pęcherzyków powietrza może być bardzo zróżnicowana. Podobnie podczas mieszania ścieków w ich warstwach powierzchniowych następuje tworzenie fali, która staje się źródłem pękających pęcherzyków powietrza. Jednak niezależnie od wielkości wszystkich pęcherzyków powietrza, ich zewnętrzna część pokryta jest błoną, która jest odzwierciedleniem biofilmu zawierającego liczne drobnoustroje występujące w ściekach. Gdy pęcherzyki dotrą do warstwy granicznej ścieki-powietrze, wówczas pękają, tworząc drobne i grubsze krople, które wynoszą do powietrza zarówno drobniny ścieków, jak i drobnoustroje zawarte w ściekach i biofilmie. Mechanizm wydostawania się z cieczy i przenoszenia przez wiatr drobnoustrojów zawartych w bioaerozolu polega na działaniu energii kinetycznej

uzyskanej przez cząstki podczas tworzenia się bioaerozolu (siła przewyższająca grawitację) oraz w wyniku swobodnego przenoszenia cząstek wraz z prądami powietrza [60]. Miejsca największej emisji bioaerozoli podawane przez różnych autorów są najczęściej podobne i obejmują urządzenia do wstępnego oczyszczania ścieków (kraty, piaskowniki, osadniki wstępne) [7, 67, 85, 87–92] oraz ich napowietrzania (bioreaktory) [25, 58, 67, 81, 83–86], a także miejsca przeróbki osadów ściekowych [7, 25, 84, 88–91, 93]. Źródłem największego niebezpieczeństwa jest etap biologicznego oczyszczania ścieków zawierających drobnoustroje chorobotwórcze, oportunistyczne i ich toksyny. Najbardziej patogenne formy bakterii mogą być obecne nawet w ściekach oczyszczonych odprowadzanych do wód powierzchniowych [42, 94]. Urządzenia do oczyszczania ścieków wytwarzają bioaerozol, które może być transportowany przez wiatr na znaczną odległość, przy czym ilość i skład bioaerozolu ma znaczący wpływ na jakość powietrza na terenie i w sąsiedztwie oczyszczalni ścieków [65, 81].

Pracownicy oczyszczalni ścieków mogą być narażeni na bioaerozole, aeroalergeny i inne zawieszone w powietrzu cząstki organiczne, a także substancje chemiczne, które mogą być przyczyną licznych chorób [21, 95]. Patogeny obecne w ściekach, skratkach czy osadach ściekowych mogą natomiast stanowić poważne zagrożenie zdrowia pracowników obsługujących sieć i urządzenia kanalizacyjne. Do najczęściej spotykanych chorób u tych ludzi należą zapalenie pęcherzyków płucnych na tle alergicznym, grzybiczne zapalenie płuc, biegunki i infekcje układu pokarmowego, zapalenie spojówek oraz niezbyt błon śluzowych nosa. Pracownicy często mają kaszel, złe samopoczucie oraz trudności w oddychaniu. Wirusy, bakterie, grzyby oraz toksyny, które są przez nie wytwarzane mogą być przyczyną infekcji, alergii oraz zatruc u pracowników oczyszczalni ścieków i mieszkańców okolicznych terenów [4, 7, 21, 24, 26, 70, 81]. Obserwuje się jednocześnie wyraźny wzrost zainteresowania działaniami czynników biologicznych na zdrowie publiczne i zawodowe, a badania w dziedzinie medycyny pracy wykazały, że narażenie zawodowe na bioaerozole z dużą zawartością bakterii i grzybów w takich miejscach pracy, jak oczyszczalnie ścieków, kompostownie i składowiska odpadów, może prowadzić do licznych chorób [42, 62, 63, 84, 93, 96].

Badania mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza na terenach obiektów komunalnych (w odniesieniu do naturalnego tła) umożliwiają określenie potencjalnej odległości negatywnego oddziaływania danego obiektu na okoliczne środowisko, a jednocześnie wskazanie odległości, na którą mogą być przenoszone patogeny. Liczni autorzy podają, że negatywny wpływ oczyszczalni ścieków, kompostowni czy składowiska odpadów kończy się przy granicy obiektu i nie stwierdza się mikrobiologicznego skażenia okolicznych terenów. Jednak są również publikacje wskazujące, że odległość ta jest znacznie większa oraz że z mikrobiologicznego punktu widzenia nie ma czystego powietrza w pobliżu oczyszczalni ścieków [83]. Liczba promieniowców i gronkowców oraz obecność bakterii *Pseudomonas fluorescens* oraz z rodzajów *Salmonella* i *Enterococcus* w punkcie pomiarowym zlokalizowanym poza oczyszczalnią ścieków (w tle) świadczyła o jej negatywnym oddziaływaniu na najbliższe otoczenie [87]. W pracy [97] wyznaczono zasięg negatywnego oddziaływania oczyszczalni na stan sanitarny powietrza atmosferycznego, który wynosił około 550 m. Do podobnych wniosków doszli autorzy pracy [98], którzy badając wpływ oczyszczalni ścieków na jakość życia ludzi żyjących w pobliżu obiektów

komunalnych stwierdzili, że w promieniu 500 m występują liczne szczepy bakterii, w tym chorobotwórczych, stwierdzano u ludzi stany chorobowe oraz skargi mieszkańców na nieprzyjemny zapach. Większy zasięg oddziaływania obiektu opisano w pracy [99], w której odległość oddziaływania składowiska odpadów na stan sanitarny powietrza atmosferycznego oceniono na 1000÷1200 m, licząc od ogrodzenia obiektu. W badaniach nad oddziaływaniem bioaerozolu ścieków mleczarskich stwierdzono, że w promieniu 1÷10 km od źródła emisji stopniowo malało zanieczyszczenie powietrza, a w odległości 10 km występowało już minimalne ryzyko infekcji [100]. Wyniki badań wskazują jednocześnie, że w miarę zwiększania się odległości od urządzeń i obiektów komunalnych stopień mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza maleje, dochodząc do poziomu zbliżonego do tła. Niestety wiele obiektów komunalnych, zwłaszcza oczyszczalnie ścieków, znajduje się w stosunkowo bliskiej odległości od skupisk ludzkich, dlatego emisje atmosferyczne, w tym bioaerozole oraz odory mają bezpośredni wpływ na otoczenie i jakość powietrza.

Bioaerozol uwalniany w trakcie oczyszczania ścieków gromadzi się na powierzchni gleby, przenoszony jest wraz z wiatrem na okoliczne tereny i może powodować skażenie roślin, zwierząt, wód powierzchniowych, a także wpływać na ludzi żyjących w bezpośrednim lub dalszym sąsiedztwie oczyszczalni. Szczególną formą dolegliwości, która występuje u osób obsługujących systemy kanalizacyjne i oczyszczalnie ścieków jest „syndrom pracowników kanalizacji” (sewage worker’s syndrome) [96]. Składniki bioaerozolu przekazywane są najczęściej drogą powietrzno-kropelkową lub powietrzno-pyłową i wnikają do organizmu człowieka przez drogi oddechowe, błony śluzowe lub skórę. Mogą być również przenoszone przez zwierzęta (np. owady, gryzonie), a rzadziej drogą pokarmową. Wśród zaleceń dotyczących metod zapobiegania narażeniom na szkodliwe bioaerozole wymienia się stosowanie procesów ograniczających emisję, izolację urządzeń za pomocą przegród lub zasłon z tworzywa, częściową lub pełną hermetyzację obiektów, stosowanie urządzeń wentylacyjnych, ograniczenie czasu pracy w miejscach narażenia na największe stężenia bioaerozolu, stosowanie masek, rękawic, okularów i innych środków ochrony indywidualnej, a także stosowanie pasów zieleni wokół obiektów komunalnych [76, 89, 97]. W obiektach, w których występuje emisja bioaerozoli powinna być instalowana odpowiednia wentylacja i filtracja powietrza oraz należy stosować optymalizację procesów technologicznych, aby zminimalizować narażenie pracowników na działanie czynników biologicznych i chemicznych. Konieczne jest także monitorowanie czynników biologicznych w miejscu pracy oraz prowadzenie ocen narażenia zawodowego [67, 73, 74, 81, 95, 101, 102]. Niektórzy autorzy wspominają także o zalecanej minimalnej 400÷1000 m strefie buforowej między obiektami komunalnymi a budynkami mieszkalnymi, aby zminimalizować oddziaływanie tych obiektów na zdrowie okolicznych mieszkańców [103].

Podstawowe przepisy prawa dotyczące bioaerozoli

Obowiązujące w Polsce przepisy dotyczące mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza są mało precyzyjne. Normy pochodzące z końca lat 80. XX w. [104], omawiające metody badań mikrobiologicznych powietrza, zostały wycofane w 2015 r., bez zastąpienia ich nowymi przepisami. Z tego względu większość badań tego typu była i nadal jest wykonywana zgodnie z tymi przepisami.

W nowych normach [105–107] nie podano wartości dopuszczalnych stężeń mikroorganizmów i endotoksyn, które służą do oceny czystości/zanieczyszczenia powietrza. Dotyczy to zarówno środowiska zewnętrznego, jak i wewnętrznego na stanowiskach pracy. W związku z brakiem konkretnych przepisów dotyczących mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza, w literaturze spotyka się różne propozycje i interpretacje dopuszczalnej zawartości drobnoustrojów, która świadczy o czystości lub skażeniu powietrza atmosferycznego [73, 108–111].

Zagrożenie zdrowia ludzi, wynikające ze skażenia powietrza atmosferycznego, odgrywa bardzo ważną rolę. Zgodnie z ustawą Prawo ochrony środowiska [112, 113], oddziaływanie zanieczyszczeń na środowisko należy rozumieć również jako oddziaływanie na zdrowie ludzi. Przez zanieczyszczenie rozumie się natomiast emisję, która może wpływać szkodliwie na zdrowie ludzi lub stan środowiska, powodować szkodę w dobrach materialnych, pogarszać walory estetyczne środowiska lub kolidować z innymi – uzasadnionymi – sposobami korzystania ze środowiska. Potwierdzeniem negatywnego oddziaływania obiektów komunalnych na środowisko jest § 2.1. pkt 40 rozporządzenia Rady Ministrów z 9 listopada 2010 r. [114] mówiący o tym, że oczyszczalnie ścieków przewidziane do obsługi nie mniej niż 100 tys. równoważnych mieszkańców są zaliczane do przedsięwzięć mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko, natomiast zgodnie z § 3.1. pkt 77 tego rozporządzenia do przedsięwzięć mogących potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko zalicza się instalacje do oczyszczania ścieków przewidziane do obsługi nie mniej niż 400 równoważnych mieszkańców. Mimo to w wielu oczyszczalniach ścieków nie bada się i nie ocenia potencjalnych źródeł uciążliwości oraz negatywnych skutków oddziaływania poszczególnych obiektów na środowisko zewnętrzne. Sporadycznie wykonuje się również na terenach oczyszczalni ocenę ryzyka związanego z biologicznymi czynnikami szkodliwymi dla zdrowia pracowników. Problematyka ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na biologiczne czynniki szkodliwe dla zdrowia została określona w dyrektywie 2000/54/WE [115], zgodnie z którą konieczne jest monitorowanie tych czynników i prowadzenie oceny zagrożenia zawodowego. Na dokumentach tych wzorują się także polskie przepisy [116]. Znowelizowane w Polsce przepisy zobowiązują pracodawcę do oceny ryzyka zawodowego stwarzanego przez czynniki biologiczne, chemiczne i fizyczne występujące w środowisku pracy, w tym między innymi w oczyszczalniach ścieków. Regulują to takie akty prawne, jak Kodeks Pracy [117] oraz rozporządzenia Ministra Zdrowia [118, 119].

Mimo że w Polsce obowiązują przepisy w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy [118], nawiązujące do dyrektywy 2000/54/WE [115], to nie nakładają one jednak na pracodawcę bezwzględnego obowiązku wykonywania badań i pomiarów szkodliwych czynników biologicznych. Polskie przepisy jasno określają, jakie niebezpieczeństwa mogą występować przy kontakcie ludzi z czynnikami biologicznymi. W § 2.2. rozporządzenia Ministra Zdrowia [118] podano, że „szkodliwe czynniki biologiczne obejmują drobnoustroje komórkowe, pasożyty wewnętrzne, jednostki bezkomórkowe zdolne do replikacji lub przenoszenia materiału genetycznego, w tym zmodyfikowane genetycznie hodowle komórkowe, które mogą być przyczyną zakażenia, alergii lub zatrucia”. Zatem, podobnie jak w dyrektywie 2000/54/WE,

jest to określenie niezbyt precyzyjne. Na liście czynników biologicznych szkodliwych dla pracowników oczyszczalni ścieków, pracowników kanalizacji miejskiej oraz hydraulików i konserwatorów urządzeń wodno-kanalizacyjnych znajduje się kilkadziesiąt patogennych wirusów, bakterii, grzybów i pasożytów, które zgodnie z klasyfikacją Ministerstwa Zdrowia [118] i Instytutu Medycyny Wsi [116] są zaliczane do różnych grup zagrożenia, w skali od 1 do 4. Klasyfikacja szkodliwych czynników biologicznych wyszczególnia cztery grupy zagrożenia [118]:

– grupa 1: czynniki, przez które wywołanie chorób u ludzi jest mało prawdopodobne,

– grupa 2: czynniki, które mogą wywoływać choroby u ludzi, mogą być niebezpieczne dla pracowników, ale rozprzestrzenianie ich w populacji ludzkiej jest mało prawdopodobne; zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia,

– grupa 3: czynniki, które mogą wywoływać u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, a rozprzestrzenianie ich w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne. Zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia,

– grupa 4: czynniki, które wywołują u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, a rozprzestrzenianie czynników w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne. Zazwyczaj nie istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia.

Zgodnie z § 4.1. rozporządzenia Ministra Zdrowia [118] w celu ochrony pracowników przed zagrożeniami spowodowanymi przez każdy szkodliwy czynnik biologiczny, pracodawca jest zobowiązany do stosowania wszelkich dostępnych środków eliminujących narażenie lub ograniczających stopień tego narażenia. W przypadku występowania zagrożenia biologicznego na danym terenie powinno się o tym informować pracowników oczyszczalni, a także należy umieszczać znak ostrzegający (piktogram) przed zagrożeniami biologicznymi.

Podsumowanie

Bioaerzol może być emitowany do otaczającego powietrza na różnych etapach oczyszczania ścieków i składowania odpadów i z tego względu powinien być on najczęściej badany czynnikiem szkodliwym i uciążliwym występującym na terenach i w sąsiedztwie obiektów komunalnych. Ponieważ aerzol biologiczny ma istotny udział w rozprzestrzenianiu się patogenów i łatwo przenika do układu oddechowego ludzi i zwierząt, dlatego notuje się wzrost zainteresowania tym zjawiskiem. Badania bioaerzolu częściej prowadzone są przez jednostki naukowe, niż przez instytucje kontrolne, które mogą oceniać ryzyko wynikające z kontaktu ludzi z materiałem biologicznym. Zwykle badania bioaerzolu umożliwiają wskazanie potencjalnych źródeł emisji drobnoustrojów do powietrza atmosferycznego, co pozwala na stosowanie różnych metod ograniczania skażenia powietrza wokół obiektów komunalnych (częściowa lub pełna hermetyzacja urządzeń technologicznych, filtracja powietrza przez biofiltry, dezynfekcja skratek i piasku i inne), a także na wyznaczenie zasięgu negatywnego wpływu danego obiektu na okoliczne tereny. Obowiązujące w Polsce przepisy dotyczące mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza są mało precyzyjne i nie zawierają na przykład dopuszczalnej liczebności mikroorganizmów i zawartości endotoksyn, które służą do oceny czystości lub stopnia zanieczyszczenia powietrza.

LITERATURA

1. P. DUQUENNE, G. MARCHAND, C. DUCHAINE: Measurement of endotoxins in bioaerosols at workplace: A critical review of literature and a standardization issue. *The Annals of Occupational Hygiene* 2012, Vol. 57, No. 2, pp. 137–172.
2. S. MATTHIAS-MASER, B. BOGS, R. JAENICKE: The size distribution of primary biological aerosol particles in cloud water on the mountain Kleiner Feldberg/Taunus (FRG). *Atmospheric Research* 2000, Vol. 54, pp. 1–13.
3. A. MICHALAK, K. PAWLAS: Endotoksyny jako źródło środowiskowego oraz zawodowego zagrożenia dla zdrowia człowieka. *Medycyna Środowiskowa* 2013, vol. 16, nr 2, ss. 7–13.
4. J. FRÖHLICH-NOWOISKY, C. J. KAMPF, B. WEBER, J. A. HUFFMAN, C. PÖHLKER, M. O. ANDREAE, N. LANGYONA, S. M. BURROWS, S. S. GUNTHER, W. ELBERT, H. SU, P. HOOR, E. THINES, T. HOFFMANN, V. R. DESPRÉS, U. PÖSCHL: Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research* 2016, Vol. 182, pp. 346–376.
5. U. PÖSCHL: Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition* 2005, Vol. 44, pp. 7520–7540.
6. A. ROODBARI, K. NADDAFI, A. JAVID: Measurements of bioaerosols in the air around the facilities of waste collection and disposal. *Environment Protection Engineering* 2013, Vol. 39, No. 4, pp. 105–112.
7. M. KOWALSKI, J. WOLANY, J. S. PASTUSZKA, G. PŁAZA, A. WLAZŁO, K. ULFIG, A. MALINA: Characteristics of airborne bacteria and fungi in some Polish wastewater treatment plants. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2017, Vol. 14, pp. 2181–2192.
8. J. DOUWES, P. THORNE, N. PEARCE: Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Annals of Occupational Hygiene* 2003, Vol. 47, No. 3, pp. 187–200.
9. T. LEE, S. A. GRINSHUPUN, D. MARTUZEVICIUS, A. ADHIKARI, C. M. CRAWFORD, J. LUO, T. REPONEN: Relationship between indoor and outdoor bioaerosols collected with a button inhalable aerosol sampler in urban homes. *Indoor Air* 2006, Vol. 16, No. 1, pp. 37–47.
10. A. PRINGLE: Asthma and the diversity of fungal spores in air. *PLoS Pathogens* 2013, Vol. 9, No. 6, e1003371.
11. S. FUZZI, U. BALTENSPERGER, K. CARSLAW, S. DECESARI, H. DENIER van der GON, M. C. FACCHINI, D. FOWLER, I. KOREN, B. LANGFORD, U. LOHMANN, E. NEMITZ, S. PANDIS, I. RIIPINEN, Y. RUDICH, M. SCHAAP, J. G. SLOWIK, D. V. SPRACKLEN, E. VIGNATI, M. WILD, M. WILLIAMS, S. GILARDONI: Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2015, Vol. 15, pp. 8217–8299.
12. H. S. ALYASI, R. ISAIFAN: A review on pollution emissions and impact from waste treatment and disposal facilities. *Journal of Environmental and Toxicological Studies* 2018, Vol. 2, No. 1, pp. 1–9.
13. M. F. YASSIN, S. ALMOUQATEA: Assessment of airborne bacteria and fungi in an indoor and outdoor environment. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 535–544.
14. C. TOMASI, A. LUPI: Primary and secondary sources of atmospheric aerosol. In: C. TOMASI, S. FUZZI, A. KOKHANOVSKY [Eds.]: *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2017, pp. 1–86.
15. R. JAENICKE: Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere. *Science* 2005, Vol. 308, No. 5718, p. 73.
16. P. DOUGLAS, I. BAKOLIS, D. FECHT, C. PEARSON, M. L. SANCHEZ, R. KINNERSLEY, K. de HOOGH, A. L. HANSELL: Respiratory hospital admission risk near large composting facilities. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2016, Vol. 219, pp. 372–379.
17. K. H. KIM, E. KABIR, S. A. JAHAN: Airborne bioaerosols and their impact on human health. *Journal of Environmental Sciences* 2018, Vol. 67, pp. 23–35.
18. S. FUZZI, M. O. ANDREA, B. J. HUEBERT, M. KULLA, T. C. BOND, M. BOY, S. J. DOHERTY, A. GUENTHER, M. KANAKIDOU, K. KAWAMURA, V. M. KERMINEN, U. LOHMANN, L. M. RUSSELL, U. PÖSCHL: Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2006, Vol. 6, pp. 2017–2038.
19. J. LÖNDAHL: Physical and biological properties of bioaerosols. In: P. JONSSON, G. OLOFSSON, T. TJÄRNHAGE [Eds.]: *Bioaerosol Detection Technologies*. Springer-Verlag, New York 2014, pp. 33–48.
20. J. MANDAL, H. BRANDL: Bioaerosols in indoor environment – a review with special reference to residential and occupational locations. *The Open Environmental & Biological Monitoring Journal* 2011, Vol. 4, pp. 83–96.
21. W. KINDZIERSKI, M. A. BARI, X. WANG, T. WETMORE, R. MAAL-BARED, C. MICHAELS: Evidence of wastewater treatment plant worker biohazard exposure and health symptom responses. CSBE conference, Edmonton 2015, Paper No. 15-090.
22. T. MAKI, K. HARA, A. IWATA, K. C. LEE, K. KAWAI, K. KAI, F. KOBAYASHI, S. B. POINTING, S. ARCHER, H. HASEGAWA, Y. IWASAKA: Variations in airborne bacterial communities at high altitudes over the Noto Peninsula (Japan) in response to Asian dust events. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2017, Vol. 17, pp. 11877–11897.
23. S. MENTESE, D. TASDIBI: Airborne bacteria levels in indoor urban environments: The influence of season and prevalence of sick building syndrome (SBS). *Indoor and Built Environment* 2016, Vol. 25, No. 3, pp. 563–580.
24. J. P. G. van LEUKEN, A. N. SWART, A. H. HAVELAAR, A. van PUL, W. van der HOEK, D. HEEDERIK: Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock – a review to inform risk assessment studies. *Microbial Risk Analysis* 2016, Vol. 1, pp. 19–39.
25. M. MICHALKIEWICZ, A. PRUSS, Z. DYMACEWSKI, J. JEŻ-WALKOWIAK, S. KWAŚNA: Microbiological air monitoring around municipal wastewater treatment plants. *Polish Journal of Environmental Studies* 2011, Vol. 20, No. 5, pp. 1243–1250.
26. S. NIAZI, M. S. HASSANVAND, A. H. MAHVI, R. NABIZADEH, M. ALIMOHAMMADI, S. NABAVI, S. FARIDI, A. DEGHANI, M. HOSEINI, M. MORADI-JOO, A. MOKAMEL, H. KASHANI, N. YARALI, M. YUNESIAN: Assessment of bioaerosol contamination (bacteria and fungi) in the largest urban wastewater treatment plant in the Middle East. *Environmental Science and Pollution Research* 2015, Vol. 22, No. 20, pp. 16014–16021.
27. H. BAUER, E. SCHUELLER, G. WEINKE, A. BERGER, R. HITZENBERGER, I. L. MARR, H. PUXBAUM: Significant contributions of fungal spores to the organic carbon and to the aerosol mass balance of the urban atmospheric aerosol. *Atmospheric Environment* 2008, Vol. 42, pp. 5542–5549.
28. G. CAI: Fungal DNA, mould, dampness and allergens in schools and day care centers and respiratory health. *Acta Universitatis Upsaliensis, Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Medicine* 942, Uppsala 2013, pp. 1–85.
29. W. ELBERT, P. E. TAYLOR, M. O. ANDREAE, U. PÖSCHL: Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: Active discharge of spores, carbohydrates, and inorganic ions by Asco- and Basidiomycota. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 2006, Vol. 6, pp. 11317–11355.
30. W. ELBERT, P. E. TAYLOR, M. O. ANDREAE, U. PÖSCHL: Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: Wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2007, Vol. 7, pp. 4569–4588.
31. M. W. F. FISCHER, J. L. STOLZE-RYBCZYNSKI, Y. CUI, N. P. MONEY: How far and how fast can mushroom spores fly? Physical limits on ballistospore size and discharge distance in the Basidiomycota. *Fungal Biology* 2010, Vol. 114, No. 8, pp. 669–675.

32. M. K. REDDY, P. SARITA, T. SRINIVAS: A study of fungi in air in selected areas of Visakhapatnam city, India. *European Journal of Experimental Biology* 2015, Vol. 5, pp. 10–14.
33. L. LIANG, G. ENGLING, K. HE, Z. DU, Y. CHENG, F. DUAN: Evaluation of fungal spore characteristics in Beijing, China, based on molecular tracer measurements. *Environmental Research Letters* 2013, Vol. 8, 014005, pp. 1–10.
34. N. MURADOV, M. TAHA, A. F. MIRANDA, D. WREDE, K. KADALI, A. GUJAR, T. STEVENSON, A. S. BALL, A. MOURADOV: Fungal-assisted algal flocculation: application in wastewater treatment and biofuel production. *Biotechnology for Biofuels* 2015, Vol. 8, pp. 1–24.
35. J. H. PARK, J. M. COX-GANSER: Mold exposure and respiratory health in damp indoor environments. *Frontiers in Bioscience* 2011, Vol. 3, No. 2, pp. 757–771.
36. E. QUINTERO, B. BOLAÑOS, S. CANTRELL: Molecular identification of airborne fungal spores from Caguas and San Juan, Puerto Rico. 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Cancun 2013, pp. 1–9.
37. A. CHRISOSTOMOU, M. MOUSTAKA-GOUNI, S. SGARDELIS, T. LANARAS: Air-dispersed phytoplankton in a Mediterranean river-reservoir system (Aliakmon-Polyphytos, Gerce). *Journal of Plankton Research* 2009, Vol. 31, No. 8, pp. 877–884.
38. A. U. LEWANDOWSKA, S. ŚLIWIŃSKA-WILCZEWSKA, D. WOŹNICZKA: Identification of cyanobacteria and microalgae in aerosols of various sizes in the air over the Southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 2017, Vol. 125, pp. 30–38.
39. W. FOISSNER: Dispersal and biogeography of protists: Recent advances. *Japanese Journal of Protozoology* 2007, Vol. 40, No. 1, pp. 1–16.
40. K. S. GOLOKHAVAST: Airborne biogenic particles in the snow of the cities of the Russian far east as potential allergic compounds. *Journal of Immunology Research* 2014, Article ID 141378.
41. S. V. M. TESSON, C. A. SKJĚRTH, T. ŠANTL-TEMKIV, J. LÖNDAHL: Airborne microalgae: Insights, opportunities, and challenges. *Applied and Environmental Microbiology* 2016, Vol. 82, No. 7, pp. 1978–1991.
42. B. SILVAE, A. GALES, J. HAMELIN, N. WERY, J. P. STEYER: Bioaerosol emission from open microalgal processes and their potential environmental impacts: What can be learned from natural and antropogenic aquatic environments? *Current Opinion in Biotechnology* 2015, Vol. 33, pp. 279–286.
43. T. O. WOMILOJU, J. D. MILLER, P. M. MAYER, J. R. BROOK: Methods to determine the biological composition of particulate matter collected from outdoor air. *Atmospheric Environment* 2003, Vol. 37, pp. 4335–4344.
44. A. KUPARINEN: Mechanistic models for wind dispersal. *Trend in Plant Science* 2006, Vol. 11, No. 6, pp. 296–301.
45. C. LIU, Y. YIN: Inherent optical properties of pollen particles: A case study for the morning glory pollen. *Optics Express* 2016, Vol. 24, No. 2, pp. A104–A113.
46. F. D. POPE: Pollen grains are efficient cloud condensation nuclei. *Environmental Research Letters* 2010, Vol. 5, pp. 1–6.
47. C. M. RATHNAYAKE, N. METWALI, T. JAYARATHNE, J. KETTLER, Y. HUANG, P. S. THORNE, P. T. O'SHAUGHNESSY, E. A. STONE: Influence of rain on the abundance of bioaerosols in fine and coarse particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2017, Vol. 17, pp. 2459–2475.
48. J. FRÖHLICH-NOWOISKY, C. RUZENE NESPOLI, D. A. PICKERSGILL, P. E. GALAND, I. MÜLLER-GERMANN, T. NUNES, J. GOMES CARDOSO, S. M. ALMEIDA, C. PIO, M. O. ANDREAE, R. CONRAD, U. PÖSCHL, V. DESPRÉS: Diversity and seasonal dynamics of airborne archaea. *Biogeosciences* 2014, Vol. 11, pp. 6067–6079.
49. P. B. LECOURE, M. VEILLETTE, D. MARSOLAIS, Y. CORMIER, S. KIRYCHUK, C. DUCHAINE: Archaea in bioaerosols in dairy farms, poultry houses and wastewater treatment plants and their role in lung inflammation. Chemical and Biological Hazards Prevention, Studies and Research Projects, Report R-845, IRSST, Montréal 2014.
50. D. J. SMITH, H. J. TIMONEN, D. A. JAFFE, D. W. GRIFFIN, M. N. BIRMELE, K. D. PERRY, P. D. WARD, M. S. ROBERTS: Intercontinental dispersal of bacteria and archaea by transpacific winds. *Applied and Environmental Microbiology* 2013, Vol. 79, No. 4, pp. 1134–1139.
51. N. YAMAMOTO, C. TADA, Y. NAKAI: Archaeal community during cattle manure composting process in field-scale facility. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 2011, Vol. 8, pp. 55–59.
52. J. R. BROWN, J. W. TANG, L. PANKHURST, N. KLEIN, V. GANT, K. M. LAI, J. MCCAULEY, J. BREUER: Influenza virus survival in aerosols and estimates of viable virus loss resulting from aerosolization and air-sampling. *Journal of Hospital Infection* 2015, Vol. 91, No. 3, pp. 278–281.
53. M. LOS: Virus detection today. In: G. WĘGRZYŃ [Ed.]: *Modern Bacteriophage Biology and Biotechnology*. Research Signpost, Kerala 2006, pp. 131–152.
54. D. VERREAULT, S. MOINEAU, C. DUCHAINE: Methods for sampling of airborne viruses. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 2008, Vol. 72, No. 3, pp. 413–444.
55. Y. ZHAO, A. J. A. AARNINK, W. WANG, T. FABRI, P. W. G. GROOT KOERKAMP, M. C. M. de JONG: Airborne virus sampling – efficiencies of samplers and their detection limits for infectious bursal disease virus (IBDV). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 2014, Vol. 21, No. 3, pp. 464–471.
56. J. H. BYEON, C. W. PARK, K. Y. YOON, J. H. PARK, J. HWANG: Size distributions of total airborne particles and bioaerosols in a municipal composting facility. *Bioresource Technology* 2008, Vol. 99, pp. 5150–5154.
57. A. GRABIŃSKA-ŁONIEWSKA, M. ŁEBKOWSKA, B. SŁOMCZYŃSKA, T. SŁOMCZYŃSKI, A. RUTKOWSKA-NAROŹNIAK, E. ZBOROWSKA: *Biologia Środowiska*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2011.
58. E. KORZENIEWSKA, Z. FILIPKOWSKA, A. GOTKOWSKA-PLACHTA: Miejska oczyszczalnia ścieków z komarami osadu czynnego, napowietrzanymi aeratorami typu Celpox jako emitorem bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae* do powietrza. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2007, Vol. 32, ss. 184–189.
59. K. KRUCZALAK, K. OLAŃCZUK-NEYMAN: Microorganisms in the air over wastewater treatment plants. *Polish Journal of Environmental Studies* 2004, Vol. 13, pp. 537–542.
60. A. KULIG, K. OSSOWSKA-CYPRYK: Mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza w otoczeniu oczyszczalni ścieków. Przegląd literaturowy (w ujęciu historycznym). *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej* 2013, z. 66, ss. 56–95.
61. M. MICHAŁKIEWICZ, I. KRUSZELNICKA, M. WIDOMSKA: The variability of the concentration of bioaerosols above the chambers of biological wastewater treatment. *Ecological Chemistry and Engineering S* 2018, Vol. 25, pp. 267–278.
62. D. J. O'CONNOR, S. M. DALY, J. R. SODEAU: On-line monitoring of airborne bioaerosols released from a composting/green waste site. *Waste Management* 2015, Vol. 42, pp. 23–30.
63. A. OPPLIGER: Advancing the science of bioaerosol exposure assessment. *Annals of Occupational Hygiene* 2014, Vol. 58, No. 6, pp. 661–663.
64. M. ORSINI, P. LAURENTI, F. BONINTI, D. ARZANI, A. LANNI, V. ROMANO-SPICA: A molecular typing approach for evaluating bioaerosol exposure in wastewater treatment plant workers. *Water Research* 2002, Vol. 36, No. 5, pp. 1375–1378.
65. N. PANTALAKIS, A. PANTIDOU, N. KALOGERAKIS: Determination of enterobacteria in air and wastewater samples from a wastewater treatment plant by epi-fluorescence microscopy. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 2008, Vol. 8, No. 1, pp. 107–115.
66. B. ALEKSIC, M. DRAGHI, S. RITOUX, S. BAILLY, M. LACROIX, I. P. OSWALD, J. D. BAILLY, E. ROBINE: Aerosolization of mycotoxins after growth of toxigenic fungi on wallpaper. *Applied and Environmental Microbiology* 2017, Vol. 83, No. 16, pp. 1–12.

67. I. ZMYSŁOWSKA, M. HARNISZ, I. GOŁAŚ, A. KOMOROWSKA: Zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza na terenie miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2007, vol. 32, ss. 173–177.
68. M. KOLENDA, S. MROCZKOWSKI: Fusarium mycotoxins and methods of assessing the mycotoxicity: A review. *Journal of Central European Agriculture* 2013, Vol. 14, pp. 169–180.
69. A. BUCZYŃSKA, I. SZADKOWSKA-STANCZYK: Problemy higieny pracy i zagrożenia zdrowotne towarzyszące intensywnej produkcji trzody chlewnej. *Medycyna Pracy* 2010, vol. 61, nr 3, ss. 323–331.
70. E. YERGEAU, L. MASSON, M. ELIAS, S. XIANG, E. MADEY, H. HUANG, B. BROOKS, L.A. BEAUDETTE: Comparison of methods to identify pathogens and associated virulence functional genes in biosolids from two different wastewater treatment facilities in Canada. *PLoS ONE* 2016, Vol. 11, No. 4, pp. 1–20.
71. B. BREZA-BORUTA, Z. PALUSZAK: Influence of water treatment plant on microbiological composition of air bioaerosol. *Polish Journal of Environmental Studies* 2007, Vol. 16, No. 5, pp. 663–670.
72. A. GOTKOWSKA-PLACHTA, Z. FILIPKOWSKA, E. KORZENIEWSKA, W. JANCZUKOWICZ: Zanieczyszczenia mikrobiologiczne powietrza atmosferycznego na terenie i w otoczeniu oczyszczalni ścieków systemem stawów napowietrzanych i stabilizacyjnych. *Woda Środowisko-Obszary Wiejskie* 2008, vol. 8, nr 1, 22, ss. 83–98.
73. B. KRZYSZTOFIK: Mikrobiologia powietrza. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992.
74. A. KULIG: Aktualne zagadnienia w ocenach oddziaływania na otoczenie obiektów gospodarki ściekowej. Cz. II. Oceny wpływu bioaerozoli na jakość powietrza. *Forum Eksploatatora* 2005, vol. 3, nr 20, ss. 10–13.
75. S. MAHARIA, A. SRIVASTAVA: Influence of seasonal variation on concentration of fungal bioaerosol at a sewage treatment plant (STP) in Delhi. *Aerobiologia* 2015, Vol. 31, No. 2, pp. 249–260.
76. M. MICHALKIEWICZ, A. PRUSS, Z. DYMACEWSKI, J. MICHALAK: Wpływ hermetyzacji wybranych etapów oczyszczania ścieków na mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2009, vol. 58, nr 2, ss. 135–143.
77. D.C. BLANCHARD, L. SYZDEK: Mechanism for the water-to-air transfer and concentration of bacteria. *Science* 1970, Vol. 170, pp. 626–628.
78. S.M. BURROWS, W. ELBERT, M.G. LAWRENCE, U. POSCHL: Bacteria in the global atmosphere – Part 1: Review and synthesis of literature data for different ecosystems. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2009, Vol. 9, No. 23, pp. 9263–9280.
79. S. GENITSARIS, M. MOUSTAKA-GOUNI, K.A. KORMAS: Airborne microeukaryote colonists in experimental water containers: Diversity, succession, life histories and established food webs. *Aquatic Microbial Ecology* 2011, Vol. 62, No. 2, pp. 139–152.
80. K.J. MORRIS: Modern microscopic methods of bioaerosol analysis. In: C.S. COX, C.M. WATHES [Eds.]: *Bioaerosols Handbook*, CRC Press 1995, pp. 285–316.
81. A. WLAZŁO, J.S. PASTUSZKA, B. ŁUDZEŃ-IZBIŃSKA: Ocena narażenia na aerzol bakteryjny pracowników niedużej oczyszczalni ścieków. *Medycyna Pracy* 2002, vol. 53, nr 2, ss. 109–114.
82. B. TELTSCH, S. KEDMI, L. BONNET, Y. BORENZSTAJN-ROTEM, E. KATZENELSON: Isolation and identification of pathogenic microorganisms at wastewater-irrigated fields: Ratios in air and wastewater. *Applied and Environmental Microbiology* 1980, Vol. 39, pp. 1183–1190.
83. N. SEETHA, R. BHARGAVA, B.R. GURJAR: Gaseous and bioaerosol emissions from municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Science and Engineering* 2013, Vol. 55, No. 4, pp. 517–536.
84. K. BUDZIŃSKA, A. TRACZYKOWSKI, A. JUREK, B. SZEJNIUK, M. MICHALSKA, K. BERLEĆ: Wpływ procesów oczyszczania ścieków w technologii SBR na stan sanitarny powietrza atmosferycznego. *Rocznik Ochrona Środowiska* 2013, vol. 15, nr 1, ss. 904–923.
85. H. HEINONEN-TANSKI, T. REPONEN, J. KOIVUNEN: Airborne enteric coliphages and bacteria in sewage treatment plants. *Water Research* 2009, Vol. 43, pp. 2558–2566.
86. T.H. LIN, C.F. CHIANG, S.T. LIN, C.T. TSAI: Effects of small-size suspended solids on the emission of *Escherichia coli* from the aeration process of wastewater treatment. *Aerosol and Air Quality Research* 2016, Vol. 16, pp. 2208–2215.
87. B. BREZA-BORUTA: Ocena mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza na terenie oczyszczalni ścieków. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 2010, vol. 10, nr 3(31), ss. 49–57.
88. M. SZYŁAK-SZYDŁOWSKI, A. KULIG, E. MIAŚKIEWICZ-PĘSKA: Seasonal changes in the concentrations of airborne bacteria emitted from wastewater treatment plant. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2016, Vol. 115, pp. 11–16.
89. D. FORESTIER, É. LECORNET, L. MOSQUERON, L. LAMBOLEZ: Exposure to bioaerosols for wastewater treatment plant workers: Prioritization of the areas and tasks involving the greatest exposure, and prevention. *Environnement, Risques & Santé* 2012, Vol. 11, No. 2, 137–148.
90. S. KARRA, E. KATSIVELA: Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site. *Water Research* 2007, Vol. 41, No. 6, pp. 1355–1365.
91. M. VÍTĚZOVÁ, T. VÍTĚZ, H. MLEJNKOVÁ, T. LOŠÁK: Microbial contamination of the air at the wastewater treatment plant. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 2012, Vol. LX, No. 3, pp. 233–240.
92. M. MAŁECKA-ADAMOWICZ, Ł. KUBERA, W. DONDERSKI, K. KOLET: Microbial air contamination on the premises of the sewage treatment plant in Bydgoszcz (Poland) and antibiotic resistance of *Staphylococcus* spp. *Archives of Environmental Protection* 2017, Vol. 43, No. 4, pp. 58–65.
93. Y. LI, L. YANG, Q. MENG, X. QIU, Y. FENG: Emission characteristics of microbial aerosols in a municipal sewage treatment plant in Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research* 2013, Vol. 13, pp. 343–349.
94. X. WANG, X. WEN, Y. DENG, Y. XIA, Y. YANG, J. ZHOU: Distance-decay relationship for biological wastewater treatment plants. *Applied and Environmental Microbiology* 2016, Vol. 82, No. 16, pp. 4860–4866.
95. A. JAREMKÓW, A. KAWALEC, K. PAWLAS: Harmful factors in wastewater treatment plant – knowledge and awareness of workers about hazards. *Problemy Higieny i Epidemiologii* 2018, Vol. 99, No. 2, pp. 189–195.
96. M. KERMANI, A. DEGHANI, M. FARZADKIA, F.B. BAHRAMI-ASL, D. ZEINALZADEH: Assessment of bioaerosol contamination in an urban wastewater treatment plant in Tehran, Iran. *Journal of Air Pollution and Health* 2016, Vol. 1, No. 3, pp. 161–170.
97. B. KOLWZAN, P. JADCZYK, G. PASTERNAK, J. GŁUSZCZAK, M. PAWLIK, M. KRAWCZYŃSKA, J. KLEIN, J. RYBAK: Ocena stanu sanitarnego powietrza w otoczeniu wybranej oczyszczalni ścieków (Assessing air quality in the proximity of a municipal sewage treatment plant: A case study). *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 2, ss. 9–14.
98. A. VANTARAKIS, S. PAPPARODOPOULOS, P. KOKKINOS, G. VANTARAKIS, K. FRAGOU, I. DETORAKIS: Impact on the quality of life when living close to a municipal wastewater treatment plant. *Journal of Environmental and Public Health* 2016, ID 8467023, pp. 1–8.
99. M. KAŻMIERCZUK, A. BOJANOWICZ-BABŁOK: Bioaerosol concentration in the air surrounding municipal solid waste landfill. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2014, Vol. 25, No. 2(60), pp. 17–25.

100. R. S. DUNGAN: Estimation of infectious risks in residential populations exposed to airborne pathogens during center pivot irrigation of dairy wastewaters. *Environmental Science & Technology* 2014, Vol. 48, pp. 5033–5042.
101. J. V. TEIXEIRA, S. MIRANDA, R. A. R. MONTEIRO, F. V. S. LOPES, J. MADUREIRA, G. V. SILVA, N. PESTANA, E. PINTO, V. J. P. VILAR, R. A. R. BOAVENTURA: Assessment of indoor airborne contamination in a wastewater treatment plant. *Environmental Monitoring and Assessment* 2013, Vol. 185, No. 1, pp. 59–72.
102. A. A. A. HAMEED, T. HABEEBUALLAH, B. MASHAT, S. ELGENDY, T. H. ELMORSY, S. ELSEROUGY: Airborne fungal pollution at waste application facilities. *Aerobiologia* 2015, Vol. 31, No. 3, pp. 283–293.
103. D. J. L. FORGIE, L. W. SASSER, M. K. NEGER: Compost Facility Requirements Guideline: How to Comply with Part 5 of the Organic Matter Recycling Regulation. Ministry of Water Land and Air Protection, British Columbia, Canada 2004.
104. PN-Z-04111/01,02,03:1989: Ochrona czystości powietrza – Badania mikrobiologiczne (normy wycofane).
105. PN-EN 13098:2007: Powietrze na stanowiskach pracy – Wytyczne dotyczące pomiaru mikroorganizmów i endotoksyn zawieszonych w powietrzu.
106. PN-EN 14042:2010: Powietrze na stanowiskach pracy – Przewodnik wdrażania i stosowania procedur do oceny narażenia na czynniki chemiczne i biologiczne.
107. PN-EN ISO 14698-2:2005: Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Kontrola biozanieczyszczeń – Część 2: Ocena i interpretacja danych o biozanieczyszczeniach.
108. M. J. CHMIEL, K. FRĄCZEK, J. GRZYB: Problemy monitoringu zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 2015, vol. 15, nr 1 (49), ss. 17–27.
109. U. GAŚKA-JĘDRUCH, M. R. DUDZIŃSKA: Zanieczyszczenia mikrobiologiczne w powietrzu wewnętrznym. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2009, vol. 59, ss. 31–40.
110. R. L. GÓRNY: Biologiczne czynniki szkodliwe: normy, zalecenia i propozycje wartości dopuszczalnych. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2004, vol. 3, nr 41, ss. 17–39.
111. R. L. GÓRNY: Aerozole biologiczne – rola normatywów higienicznych w ochronie środowiska i zdrowia. Mat. konf. „Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych”, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2009, ss. 91–102.
112. Ustawa z 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. *Dziennik Ustaw* 2001, nr 62, poz. 627.
113. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z 13 kwietnia 2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo ochrony środowiska. *Dziennik Ustaw* 2018, poz. 799.
114. Rozporządzenie Rady Ministrów z 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko. *Dziennik Ustaw* 2010, nr 213, poz. 1397.
115. Dyrektywa 2000/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 18 września 2000 r. w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy. *Dziennik Urzędowy Wspólnot Europejskich* 2000, L 262/21, ss. 48–74.
116. J. DUTKIEWICZ, R. ŚPIEWAK, L. JABŁOŃSKI: Klasyfikacja szkodliwych czynników biologicznych występujących w środowisku pracy oraz narażonych na nie grup zawodowych. Instytut Medycyny Wsi, Lublin 1999.
117. Ustawa z 2 lutego 1996 r. o zmianie ustawy – Kodeks pracy oraz o zmianie niektórych ustaw. *Dziennik Ustaw* 1996, nr 24, poz. 110.
118. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki. *Dziennik Ustaw* 2005, nr 81, poz. 716.
119. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *Dziennik Ustaw* 2011, nr 33, poz. 166.

Michałkiewicz, M. Formation, Transmission and Harmfulness of Bioaerosols Released into the Air. *Ochrona Środowiska* 2018, Vol. 40, No. 4, pp. 21–30.

Abstract: Nowadays, problems of atmospheric air contamination become increasingly important. Aerobiology, an interdisciplinary science has even developed to study microorganisms and biological materials related to the atmospheric air, including their release to the atmosphere, transport, distribution, deposition as well as effects they have on plants, animals and humans. The biological molecules most often analyzed in the air include bacteria, fungi, viruses, plant pollens, toxins and allergens as they constitute the largest bioaerosol fraction in the air. They play a special role in explaining etiology, pathogenesis and spread mechanisms of many epidemics where the air and specifically bioaerosol play an important role as carrying pathogens, toxins or allergens. With this specifically in mind, the paper discusses the process of formation, transmission and harmfulness of bioaerosols originating from such municipal facilities as wastewater treatment plants or solid waste processing facilities. Primary and secondary bioaerosols may be distinguished in this group, whereas based on the emission source, they may be of natural and anthropogenic origin. The bioaerosol molecules range from 0,001 μm to 250 μm. Due to their role in the spread of pathogens and ease with which they enter the respiratory system of humans or animals, a notably increased interest in these molecules could be observed during

recent years. In their research on aerosol and bioaerosol formation process, authors focus on the bursting mechanism of the air bubbles passing through a liquid and release of bioaerosols located in the membrane, and on the liquid-air interface, into the atmosphere. The aerosol particles released into the atmosphere undergo direct sedimentation or remain in the air, where they are transported by wind even over considerable distances. Deposition of aerosol particles may be dry or wet and increases with the particle size. Presence of aeration chambers and their shape play an important role in the release of some bioaerosol particles into the air and their transport. It is emphasized that potential sources of harmful bioaerosols in the air include mainly municipal objects (wastewater treatment and solid waste processing plants), where aerosols carrying pathogenic bacteria, fungi and toxins are generated, while composition and concentration of a given bioaerosol has a significant impact on air quality in the vicinity of such objects. As bioaerosols may be emitted to the surrounding air at different stages of the wastewater treatment, they are the most commonly studied group of hazardous and bothersome agents occurring in the vicinity of treatment plants. Unfortunately, there is a lack of revised regulations in place regarding the microbial air contamination in Poland.

Keywords: Bioaerosol, aerosol formation, transmission of aerosols, air pollution, municipal facilities, sewage treatment, solid waste disposal.