

Mikroorganizmy w instalacjach klimatyzacyjno-wentylacyjnych szpitali

Microorganisms in Air-Conditioning and Ventilation Installations in Hospitals

ANNA CHARKOWSKA, AGNIESZKA TABERNACKA

DOI 10.36119/15.2024.7-8.4

W artykule odniesiono się do problemu występowania drobnoustrojów w instalacjach klimatyzacyjno-wentylacyjnych obsługujących obiekty ochrony zdrowia i ich wpływu na stan powietrza nawiewanego do pomieszczeń. Omówiono dostępne wyniki badań stanu czystości mikrobiologicznej instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w szpitalach, z uwzględnieniem występowania poszczególnych grup i gatunków mikroorganizmów, zmienności sezonowej oraz urządzeń i miejsc najbardziej zagrożonych zasiedleniem przez drobnoustroje. Zasygnalizowano potrzebę określenia rodzajów drobnoustrojów, których obecność w instalacjach wentylacyjnych powinna być kontrolowana oraz określenia dopuszczalnych ich liczebności w powietrzu wentylacyjnym i w osadach wewnątrz instalacji.

Słowa kluczowe: drobnoustroje, szpitale, przewody wentylacyjne, centrala wentylacyjno-klimatyzacyjna, zmienność sezonowa

The article refers of the problem of the occurrence of microorganisms in air-conditioning and ventilation systems serving health care facilities and their impact on the condition of the air supplied to the premises. The available results of studies of the state of microbiological cleanliness of ventilation and air conditioning systems in hospitals are discussed, including occurrence of particular groups and species of microorganisms, seasonal variation, and the equipment and places most at risk of microbial colonization. The need has been identified to define the types of microorganisms whose presence in ventilation systems should be controlled and to determine the permissible abundances of these microorganisms in ventilation air and in the deposits inside air-conditioning and ventilation systems.

Keywords: microorganisms, hospitals, ventilation ducts, HVAC unit, seasonal variability

Wstęp

Celem niniejszego artykułu jest określenie zagrożenia zdrowotnego dla użytkowników wentylowanych pomieszczeń wynikającego z występowania drobnoustrojów w powietrzu i w pyłe osadzonym wewnątrz instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych, a także przedstawienie metod stosowanych do oceny czystości mikrobiologicznej instalacji. Problem ten jest najbardziej widoczny w przypadku obiektów ochrony zdrowia, w których przebywają pacjenci podatni na zakażenia także przenoszone drogą powietrzną, jednak dotyczy on wszystkich obiektów wyposażonych w instalacje wentylacyjno-klimatyzacyjne.

W odróżnieniu od pomieszczeń o innym przeznaczeniu, w szpitalach pacjenci o osłabionym układzie immunologicznym, o obniżonej odporności na infekcję, spędzają 100% czasu podczas hospitalizacji. Są zatem narażeni na oddziaływanie róż-

nych czynników wynikających ze stanu powietrza wewnętrznego, takich jak niewłaściwe wartości temperatury i wilgotności oraz obecność zanieczyszczeń fizycznych, chemicznych i biologicznych (Saran i in., 2020). Z tego względu utrzymanie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego jest niezbędne, ponieważ ciągłe i długotrwałe narażenie na zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach, a wśród nich na mikroorganizmy, jest niebezpieczne dla ich zdrowia (Nevalainen i in., 2015).

Systemy wentylacji i klimatyzacji, niezależnie od przeznaczenia budynku, mają za zadanie utrzymanie wymaganej temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego oraz doprowadzenie oczyszczonego powietrza o czystości odpowiedniej do przeznaczenia budynku. Božić i in. (2019) donoszą, że systemy wentylacyjno-klimatyzacyjne w szpitalach, zamiast minimalizować ryzyko przeniesienia patogenów drogą powietrzną,

mogą być idealnym środowiskiem dla rozwoju drobnoustrojów. W niektórych przypadkach, patogeny, przenoszone przez powietrze do pomieszczeń, mogą utrzymywać się w środowisku szpitalnym przez wiele miesięcy (Hiward i in., 2021).

Hiward i in. (2021) zauważają, że proponuje się wykorzystanie cząstek unoszących się w powietrzu jako wskaźnika czystości powietrza w szpitalach podczas ich użytkowania, w tym przy uruchamianiu specjalistycznych szpitalnych systemów wentylacyjnych. Należy zauważyć, że takie badanie wykonywane podczas rutynowego użytkowania jest uwzględniane w normach i wytycznych dotyczących systemów wentylacji i klimatyzacji obiektów ochrony zdrowia (m.in. DIN 1946-4:2018, Charkowska i in., 2018). Analizę mikrobiologiczną powietrza w salach operacyjnych podczas odbioru wentylacji zaleca się w skandynawskich wytycznych stowarzyszenia R³ Nordic (Solem Aune i in, 2023).

Dr inż. Anna Charkowska <http://orcid.org/0000-0001-6060-9895> – Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

Dr hab. inż. Agnieszka Tabernacka, prof. PW <http://orcid.org/0000-0002-3257-4936> – Zakład Biologii, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska. Adres do korespondencji/Corresponding author: dr inż. Anna Charkowska, Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Jednak wyniki badań, przedstawiane, w zależności od metody próbkowania, jako ogólna liczba jednostek tworzących kolonie (jtk) w 1 m³ powietrza lub jako 1 jtk/(50 cm² · 60 min), nie pozwalają w pełni określić potencjalnego zagrożenia sanitarnego powodowanego przez mikroorganizmy patogenne i potencjalnie patogenne przenoszone przez powietrze.

Niezbędna jest zatem wiedza dotycząca rodzajów i szkodliwości mikroorganizmów, które występują w powietrzu wewnętrznym i których źródłem mogą być instalacje. Bożić i in. (2019) zauważyli, że infekcje wywołane przez *Aspergillus spp.*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* i *Acinetobacter spp.* zostały powiązane ze źle konserwowanymi i/lub nieprawidłowo działającymi systemami klimatyzacji. Należy zauważyć, że wśród czynników alarmowych dla szpitali w dochodzeniach epidemiologicznych (Obwieszczenie Ministra Zdrowia, Dz.U. 2021 poz. 240) wymienia się m.in. właśnie *Aspergillus spp.*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Acinetobacter spp.*, a zatem te wskazane przez Bożić i in. (2019).

Szacuje się, że za około 5-34% całkowitego zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach są odpowiedzialne mikroorganizmy występujące w bioaerozolach. Należą do nich między innymi bakterie (np. *Legionella*, *Actinomyces*), grzyby (np. *Histoplasma*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus*), pierwotniaki (np. *Naegleria*, *Acanthamoeba*), wirusy (np. grypy) i glony (np. *Chlorococcus*) (Sturm, 2012; Burge, 1990). Efektem ekspozycji człowieka na ich działanie mogą być liczne problemy zdrowotne, od podrażnień niektórych części ciała (skóra, oczy) poprzez kłopoty z oddychaniem, astmę, alergie, do zakażenia wywołanych przez nie chorobami. Należą do nich m.in. następujące choroby:

- (i) wywoływane przez wirusy np. COVID-19, odra, różyczka, ospa wietrzna lub grypa,
- (ii) wywoływane przez bakterie: szkarlatyna (*Streptococcus pyogenes*), błonica (*Corynebacterium diphtheriae*), klasyczne zapalenie płuc (*Streptococcus pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*), zapalenie opon mózgowo-rdzeniowych (*Neisseria meningitidis*), gruźlica (*Mycobacterium tuberculosis*) lub legionelloza (*Legionella pneumophila*),
- (iii) wywoływane przez grzyby – kryptokokozja mózgowo-meningealna (*Cryptococcus neoformans*), inwazyjna kandydoza (*Candida albicans*) lub inwazyjna aspergilioza (*Aspergillus fumigatus*)

(Mentese i in., 2015; Hassan i Zeeshan, 2022).

Szpitalne są bardzo złożonym, niezwykle zmiennym i nietypowym środowiskiem pod względem zanieczyszczenia mikrobiologicznego. Ze względu na obecność wewnętrznych źródeł zanieczyszczenia (zakażonych pacjentów szpitala, zanieczyszczonego sprzętu chirurgicznego, zużytych opatrunków itp.) istnieje w nich zwiększone ryzyko występowania różnorodnych mikroorganizmów chorobotwórczych (Asif i in., 2018; Bonadonna i in., 2021; Hassan i Zeeshan, 2022). Zakażeni pacjenci wytwarzają więcej bioaerozoli podczas kaszlu, kichania i oddychania niż osoby zdrowe. Badania prowadzone przez zespoły badawcze Hospodsky i in. (2015) oraz Guo i in. (2020) wykazały, że ludzie mogą emitować około 14·10⁶ zarodników grzybów/h i 14·10⁶ komórek bakterii/h, tym samym powodując około 15 – i 81-krotny wzrost liczebności odpowiednio grzybów i bakterii w pomieszczeniu w ciągu godziny. Obecność ludzi uznaje się za podstawowe źródło zanieczyszczenia w pomieszczeniach szpitalnych.

Stężenie drobnoustrojów w powietrzu szpitalnym jest w dużym stopniu zależne również od rozwiązania systemu wentylacji, zastosowanej filtracji powietrza i od jej wydajności. Stosowanie odpowiedniej wymiany powietrza w pomieszczeniach prowadzi zazwyczaj do zmniejszania liczebności mikroorganizmów w powietrzu wewnętrznym, co zauważono m.in. w pracach Memarzadeha i Weirana (2012), Hiwarda i in. (2021) oraz w normie DIN 1946-4:2018. Niektóre badania wskazują jednak, że właśnie elementy systemu klimatyzacji i wentylacji mogą być źródłem zanieczyszczenia mikrobiologicznego w budynkach szpitalnych (Liu i in., 2018; Bożić i in., 2019; Bonadonna i in., 2021; Hassan i Zeeshan, 2022). Co więcej, nieodpowiednie warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniach, niewłaściwe materiały instalacyjne, źle zaprojektowane instalacje mogą sprzyjać rozwojowi drobnoustrojów, czyniąc szpitalne niebezpiecznym środowiskiem dla odwiedzających, personelu medycznego i pacjentów z obniżoną odpornością, oraz powodować rozprzestrzenianie się zakażeń szpitalnych (Liu i in., 2018; Bożić i in., 2019; Bonadonna i in., 2021; Hassan i Zeeshan, 2022). Z tego względu na całym świecie przeprowadza się liczne badania mające na celu ocenę składu i ilości mikroorganizmów występujących w bioaerozolach w różnych punktach szpitala, jak oddziały szpitalne, sale operacyjne, poczekalnie (Augustowska i Dutkiewicz, 2006, Napoli i in., 2012; Nasir i in.,

2015; Pertegal i in., 2023b). Jednakże bardzo niewiele danych literaturowych dotyczy oceny liczebności i składu mikroorganizmów zasiedlających instalacje wentylacyjno-klimatyzacyjne szpitali. Z tego względu w ramach niniejszej pracy dokonano przeglądu dostępnych wyników badań w tym właśnie zakresie.

Warunki rozwoju mikroorganizmów w szpitalnych instalacjach wentylacyjno-klimatyzacyjnych

W systemach wentylacji, wśród innych zanieczyszczeń, występują bakterie, grzyby pleśniowe i ich zarodniki, oraz pyłki traw i kwiatów pochodzące z powietrza atmosferycznego wprowadzanego do instalacji (Hayleeyesus i Manaye, 2014; Hospodsky i in., 2012). Ich obecność i ilość wewnątrz przewodów wentylacyjnych i w centralach oraz w powietrzu nawiewanym jest jednak zależna nie tylko od stanu powietrza zewnętrznego czerpanego do instalacji, pory roku, lokalizacji obiektu, konfiguracji centrali i układu filtracji powietrza, ale także od możliwości zasiedlania elementów systemu przez mikroorganizmy.

Mikroorganizmy rozwijające się wewnątrz systemów wentylacji i klimatyzacji to głównie bakterie i grzyby. Bakterie, wśród których dominują rodzaje *Staphylococcus*, *Micrococcus* i *Bacillus*, stanowią większość mikroorganizmów unoszących się w powietrzu w systemach klimatyzacji i wentylacji (Liu i in. 2018). Wśród bakterii gramujemnych występujących w przewodach wentylacyjnych, obecne są głównie bakterie z rodzaju *Pseudomonas*. Głównymi rodzajami grzybów są *Penicillium*, *Aspergillus* i *Cladosporium* (Liu i in. 2018).

Przez instalacje wentylacji i klimatyzacji przepływa powietrze o parametrach ciepłota-wilgotnościowych sprzyjających rozwojowi drobnoustrojów. Powierzchnie wewnętrzne przewodów wentylacyjnych i powierzchni urządzeń przygotowujących powietrze (filtry, wymienniki ciepła) stanowią bardzo dobre środowisko do wzrostu mikroorganizmów, szczególnie jeśli są wilgotne i pokryte osiadłym pyłem, zawierającym m.in. substancje organiczne. W pracach Totaro i in. (2019) oraz Ohsaki i in. (2007) wykazano, że filtry, nawilzacze powietrza i przewody wentylacyjne mogą być idealnymi miejscami do zasiedlania, namnażania i późniejszego rozprzestrzeniania się drobnoustrojów w instalacji i ich transportu wraz z powietrzem wentylacyjnym do pomieszczeń. Na podstawie badań omówionych przez Charkowską

(2000, 2002a) do wskazanych miejsc w instalacjach zagrożonych kolonizacją przez mikroorganizmy dodano tłumiki hałasu, szczególnie wtedy, gdy są umieszczone za nawilżaczem powietrza.

Filtry powietrza są wykonane z porowatych materiałów, zatrzymujących pyły i cząstki bioaerozoli. Al-Abdalall i in. (2019) wykazali, że właściwości materiału filtracyjnego mogą wpływać na zasiedlenie i rozwój grzybów podczas filtracji. Zanieczyszczenia zgromadzone na powierzchni o dużej zawartości wody umożliwiają także przetrwanie i wzrost bakterii. Maus i in. (1997) oraz Maus i in. (2001) stwierdzili, że w zakresie 30-60% wilgotności względnej oraz w optymalnej temperaturze (19-23°C) na materiałach filtracyjnych wystąpił wzrost bakterii *Bacillus subtilis* (wybranych przez autorów Maus i in. (2001) jako bakterie wskaźnikowe podczas badań w warunkach laboratoryjnych w komorze klimatycznej ze względu na ich odporność na stresogenne czynniki środowiskowe, takie jak ciepło, wysychanie, promieniowanie) oraz *Micrococcus luteus*, *Escherichia coli* i wzrost grzybów *Hansenula holstii*. Przeżywalność większości bakterii zmniejszała się z czasem, przy czym szybkość spadku przeżywalności zależała od wilgotności względnej powietrza (niższa przeżywalność przy RH<45 niż >85% w badaniach z roku 2001 i przy RH<30 niż >60% w badaniach z roku 1997), gatunku bakterii (bardziej odporne bakterie *M. luteus* niż *E. coli*) i materiału filtracyjnego. Lepsze wyniki przeżywalności uzyskano dla włókna poliestrowego stabilizowanego termicznie niż dla włókna szklanego impregnowanego ze spoiwem z żywicy akrylowej oraz dla większego obciążenia pyłem atmosferycznym. Forthomme i in. (2014) zauważyły jednak, że gdy na filtrze znajdowały się kolonie bakterii i grzybów, pleśnie *Penicillium oxalicum* rozmnażały się szybko w nasyconym wilgotnym powietrzu (wartość wilgotności powietrza wynosząca 100% była jednym z założeń badawczych), podczas gdy szczep bakterii *Staphylococcus epidermidis* nie rósł na filtrze. Autorzy stwierdzili także, że mikroorganizmy mogły rosnąć tylko wtedy, gdy wilgotność względna była wyższa niż 90%, co jest sprzeczne z wnioskami Maus i in. (1997) oraz Maus i in. (2001). Należy jednak podkreślić, że istotnym zaleceniem dotyczącym stosowania filtrów powietrza w instalacjach wentylacyjnych jest ograniczenie wilgotności względnej powietrza przepływającego przez filtry do wartości niższej niż 90%, a nawet 80%. Zgodnie z zapisami w PKN-CEN/TR 16798-4:2023-04

wilgotność względna powietrza powinna wynosić poniżej 90%, z wyjątkiem krótkich okresów w wyjątkowych warunkach pogodowych, a także średnia wilgotność względna w ciągu trzech dni musi być we wszystkich przypadkach mniejsza niż 80%. Także w normie PN-EN 16798-3:2017-09 zapisano, że w celu ochrony filtrów przed zawilgoceniem wilgotność względna powietrza przez długi czas powinna być niższa niż 80%.

Wewnątrz instalacji wentylacyjnej, za wstępnym filtrem powietrza o najniższej skuteczności, zlokalizowanym na początku centrali po stronie nawiewnej, można spodziewać się obecności zanieczyszczeń pochodzących ze środowiska zewnętrznego, nie zatrzymanych na tym filtrze. Kluczowym elementem często narażonym na zanieczyszczenie drobnoustrojami są przewody wentylacyjne.

Materiały, z których wykonane są przewody wentylacyjne, mogą sprzyjać rozwojowi drobnoustrojów. W badaniach prowadzonych przez Changa i in. (1996) określano obecność grzybów *Penicillium chrysogenum* na powierzchni czystych i zanieczyszczonych przewodów wentylacyjnych. W warunkach bardzo wysokiej wilgotności względnej powietrza (ponad 90%) i temperatury 21°C oceniono poddało trzy rodzaje przewodów wentylacyjnych. Przy umiarkowanym obciążeniu przewodów pyłem (0,4-0,7 mg/cm²) zaobserwowano rozwój grzybów na powierzchni przewodu z włókna szklanego i przewodu elastycznego. Przy wysokim obciążeniu (9-18 mg/cm²) grzyby skolonizowały także przewód ze stali ocynkowej. Rozwojowi *Penicillium chrysogenum* najbardziej sprzyjał elastyczny izolacyjny przewód wentylacyjny, w znacznie mniejszym stopniu grzyby te zasiedlały przewody wentylacyjne wykonane z włókna szklanego i pokryte folią aluminiową, a najslabiej stal ocynkowaną.

Takuma i in. (2011) przebadali izolację instalacji wykonaną z włókien szklanych pod kątem kolonizacji przez grzyby. Przed każdą zmianą pory roku (lato, zima) centrale wentylacyjne były czyszczone, łącznie z myciem filtrów i odkurzaniem pozostałych elementów, w tym izolacji z włókna szklanego. Mimo przeprowadzania tych czynności, zaobserwowano w przewodach nawiewnych na powierzchni wewnętrznej izolacji z włókna szklanego kolonie grzybów pleśniowych: *Penicillium spp.*, *Cladosporium spp.*, *Alternaria spp.*, *Ulocladium spp.*, i *Aspergillus spp.* Na 9% pobranych próbek materiału izolacyjnego po inkubacji w temperaturze 25°C zliczono ponad 250 jtk/cm².

Wymienniki ciepła i indywidualne konwektory wentylatorowe z funkcją chłodzenia są również uważane za elementy narażone na zanieczyszczenie mikrobiologiczne. Są podatne na osadzanie się pyłu i cząstek bioaerozoli, a na ich powierzchniach dochodzi do kondensacji wilgoci. Wszystkie powyższe sytuacje sprzyjają rozwojowi i rozmnażaniu się mikroorganizmów, przez co elementy te łatwo ulegają zanieczyszczeniu (Prussin, 2017).

Udział grzybów z rodzaju *Cladosporium* w układach chłodzenia powietrza jest znacznie mniejszy niż *Penicillium*, natomiast w sekcjach mieszania i filtracji powietrza sytuacja jest odwrotna (Liu i in., 2018). Co więcej, we wszystkich badaniach całkowity udział *Penicillium* i *Cladosporium* osiągał ponad 60%. Jest to istotne, ponieważ Jahnz-Różyk (2008) zauważył, że najczęstszą przyczyną alergii wziewnej są grzyby z rodzaju *Alternaria* i *Cladosporium*, a w dalszej kolejności *Penicillium* i *Aspergillus*. W zakresie temperatur 17-20°C udział grzybów z rodzaju *Aspergillus* wynosił do 25%, co jest wartością znacznie wyższą niż w innych zakresach temperatur w instalacji. Pasanen i in. (1993) zauważyli, że dla rozwoju grzybów z rodzajów *Cladosporium*, *Penicillium* i *Aspergillus* korzystna jest temperatura powietrza wynosząca 20-35°C, a dla grzybów *Alternaria* optymalna temperatura zarodnikowania mieści się w zakresie od 20 do 28°C. Mazurkiewicz-Zapałowicz i in. (2016) podali, że *Aspergillus* najlepiej rozwija się w temperaturze od 20 do 26°C, a optymalny zakres temperatury powietrza dla wzrostu gatunku *Alternaria alternata* wynosi 22-28°C. Sezonowość występowania zarodników grzybów pleśniowych w powietrzu atmosferycznym ma wpływ na ich obecność w instalacji. Szczyt sezonu zarodnikowania dla rodzaju *Alternaria* przypada na lipiec i sierpień, dla rodzaju *Cladosporium* – od czerwca do sierpnia, *Penicillium* – wiosną (Mazurkiewicz-Zapałowicz i in., 2016).

Badania instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych szpitali w Polsce

W publikacjach Charkowskiej (2001; 2002a; 2002b) przedstawiono wyniki analiz zasiedlenia przez mikroorganizmy szpitalnych instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych. Badania prowadzono w trzech instalacjach dostarczających powietrze na oddziale kardiochirurgicznym. Były to systemy o różnym przeznaczeniu (dwie instalacje – przygotowanie powietrza dla sal chorych, jedna instalacja – przygotowanie

powietrza dla sali operacyjnej) i o różnym czasie od uruchomienia. Instalacje dla sal chorych zostały wykonane odpowiednio 28 lat i 18 lat przed pomiarami, natomiast instalacja dla sali operacyjnej – 2 lata przed pomiarami. Instalacje te nie były nigdy czyszczone, ponieważ nie było wówczas takiego wymogu prawnego. Przepis regulujący konieczność czyszczenia instalacji powstał w 2005 w formie art. 72 ust. 2 Rozporządzenia (Dz.U. 2005 nr 116 poz. 985). Badania przeprowadzono latem i zimą, pobierając próbki: pyłu osadzonego w przewodach wentylacyjnych i w centralach klimatyzacyjnych, powietrza przepływającego przez centrale i przewody, powietrza nawiewanego do pomieszczeń i powietrza zewnętrznego oraz latem skroplin z tacy ociekowej chłodnicy powietrza. Centrala klimatyzacyjna dla bloku operacyjnego, jako jedyna z badanych, zawierała moduł recyrkulacji powietrza. Filtracja powietrza była realizowana na 3-stopniowym układzie: filtr klasy F5 (ISO ePM₁ 5% – 35%) na wlocie powietrza zewnętrznego, F9 (ISO ePM₁ 40% – 65%) za ostatnim urządzeniem w centrali, H13 w nawiewniku powietrza (klasy filtrów powietrza zostały podane według normy PN-EN 779:2005, przywołanej w Rozporządzeniu Dz.U. 2022 poz. 1225 oraz normy PN-EN ISO 16890-1:2017-01/Ap1:2019-04 – klasy podane w nawiasach, konwersja klas filtrów na podstawie dokumentu EUROVENT 4/23 – 2022).

Poboru prób powietrza dokonano metodą zderzeniową za pomocą aparatów szczelinowych. Próbkę pyłu zostały pobrane zgodnie z zaleceniami opisanymi w amerykańskim standardzie NADCA z roku 1992 (NADCA 01, Mechanical Cleaning of Non-Porous Air Conveyance System Components). Zastosowano standardowe metody, podłoża i warunki hodowli drobnoustrojów. We wszystkich pobranych próbkach oznaczano ogólną liczbę bakterii, bakterie pigmentowe, bakterie sporowe, bakterie hemolizujące i zieleniejące (gronkowce i paciorkowce), bakterie z rodzaju *Shigella* i *Salmonella*, bakterie z rodzaju *Pseudomonas* oraz grzyby pleśniowe.

W powietrzu zewnętrznym w lecie zaobserwowano wyższą o ponad 96% i 20% liczebność odpowiednio ogólnej liczby grzybów i bakterii w stosunku do okresu zimowego. Powietrze zewnętrzne w lecie, zgodnie z zapisami w normie PN-89/Z-04111/03, ze względu na występowanie grzybów (przede wszystkim *Penicillium sp.* oraz *Cladosporium sp.*) należało zakwalifikować jako zawierające zanieczyszczenia mogące negatywnie oddziaływać na środowisko naturalne człowieka.

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ zawilgoconego tłumika hałasu na stan powietrza nawiewanego do sal. Tłumiki hałasu stały się wtórnym źródłem zanieczyszczenia powietrza zarówno w lecie, jak i w zimie. Za tłumikiem w powietrzu nawiewanym stwierdzono znaczny wzrost ogólnej liczby bakterii, bakterii pigmentowych, bakterii hemolizujących, bakterii z rodzaju *Shigella* i *Salmonella* oraz paciorkowców zieleniejących. Obecność bakterii hemolizujących w powietrzu przepływającym przez centralę obsługującą salę operacyjną była najprawdopodobniej spowodowana mieszaniem powietrza nawiewanego i wywiewanego w komorze mieszania w centrali (system z recyrkulacją powietrza). Ponadto w okresie letnim stwierdzono znaczny wzrost liczby drobnoustrojów za filtrem II stopnia, znajdującym się w tej centrali za ostatnim urządzeniem. Zaobserwowano znaczący wzrost liczby paciorkowców zieleniejących: od 50 przed filtrem do 7600 jtk/m³ za filtrem. W lecie w powietrzu nawiewanym do sali operacyjnej stwierdzono także wysokie stężenie grzybów pleśniowych (100 jtk/m³), co mogło być spowodowane przeciekami nieoczyszczonego w wystarczającym stopniu powietrza przez nieszczelności zamocowania filtra lub przez uszkodzony materiał filtracyjny. W systemie wentylacji do sali operacyjnej filtr wysokoskutekcyjny był zainstalowany w przewodzie wentylacyjnym, a nie w nawiewnikach. Innym wyjaśnieniem tego zjawiska mogłoby być wcześniejsze zasiedlenie przez grzyby odcinka przewodu wentylacyjnego za filtrem i ich porwanie przez powietrze w późniejszym okresie pracy instalacji. Wykazano, że w lecie grzyby pleśniowe zostały częściowo zatrzymane przez wstępny filtr powietrza klasy M5. Jednocześnie zaobserwowano ich zwiększoną liczebność w powietrzu za chłodnicą pracującą z wykropleniem pary wodnej z powietrza (w tacy ociekowej chłodnicy znajdowała się woda). Powodem tego mogło być namnożenie grzybów pleśniowych

w sprzyjającym wilgotnym i ciepłym środowisku. Podczas badań w sezonie letnim zaobserwowano również zanieczyszczenie grzybami pleśniowymi przewodu recyrkulacyjnego w instalacji dla sali operacyjnej z recyrkulacją powietrza w komorze mieszania w centrali klimatyzacyjnej.

Analizując stężenia drobnoustrojów w instalacjach szpitalnych opisanych w publikacjach Charkowskiej (2000; 2001; 2002a; 2002b), zauważa się, że w większości punktów pomiarowych zostały znacznie przekroczone dopuszczalne liczebności grzybów pleśniowych w pyłe pobrany z powierzchni przewodów i urządzeń, określone w zaleceniach brytyjskiego stowarzyszenia NAAD, Regulation Guidance standards for Indoor Air Quality in Occupied Zones z roku 2021 – tabela 1. Ponadto w lecie zawartość grzybów pleśniowych i ogólna liczba mikroorganizmów w powietrzu były większe niż wskazano dla instalacji w szpitalach w propozycji klasyfikacji przygotowanej przez Serceau i in., 1992 (tabela 2). Dominującymi rodzajami grzybów pleśniowych w powietrzu i w pyłe były grzyby z rodzaju *Cladosporium* i *Penicillium*. Z powodu braku podobnych wymagań dla skroplin nie ma możliwości dokonania ich oceny pod kątem zagrożenia.

W publikacjach Kaisera i Wolskiego (2006a; 2006b; 2007) i Kaisera (2020) przedstawiono wyniki badań zanieczyszczenia systemów wentylacji i klimatyzacji obsługujących sale operacyjne w szpitalu w Kościerzynie wykonane w zimie w 2006 roku. Szpital zlokalizowany jest

Tabela 1. Kategoryzacja instalacji ze względu na zasiedlenie przez drobnoustroje pyłu na powierzchni przewodów wentylacyjnych i urządzeń – NAAD-21-Guidance, 2021
Table 1. Categorization of installations due to the colonization of dust by microorganisms on the surface of ventilation ducts and devices – NAAD-21-Guidance, 2021

Kategoria	Liczebność drobnoustrojów na powierzchni [jtk/10 cm ²] ([jtk/m ²])
Niska	<10 (<10 000)
Średnia	>10 ale <20 (>10 000 ale >20 000)
Wysoka	>20 (>20 000)

Tabela 2. Proponowana przez Serceau i in. (1992) klasyfikacja czystości powietrza w instalacjach wentylacyjnych na podstawie dopuszczalnej liczby drobnoustrojów w powietrzu
Table 2. Proposed by Serceau et al. (1992) classification of air cleanliness in ventilation systems based on the permissible number of microorganisms in the air

Klasa	Ogólna liczba bakterii jtk/m ³ powietrza – metoda aspiracyjna	Ogólna liczba mikroorganizmów – metoda sedimentacyjna (30 min)	Grzyby pleśniowe i drożdżaki jtk/m ³ powietrza – metoda aspiracyjna	Grzyby pleśniowe i drożdżaki – metoda sedimentacyjna (30 min)
Doskonała (sale operacyjne)	<100	<10	<25	<5
Dobra	100 – 750	10-25	25 – 250	1-15
Dość dobra	700-1250	25-75	250-500	10-50
Zła (do unikania/niezalecana)	>1250	>75	>500	>50

poza miastem, w obszarze niezabudowanym, z dala od traktów komunikacyjnych. Pobierano próbki powietrza w 10 lokalizacjach w centrali i w instalacji oraz w sali operacyjnej. Oceniano łącznie ogólną liczbę grzybów pleśniowych i bakterii, podając je w publikacjach jako ogólną liczbę mikroorganizmów. Zaobserwowano wzrost stężenia mikroorganizmów w instalacji od poziomu 14 jtk/m³ (powietrze zewnętrzne przy czepni) do 50 jtk/m³ (przed filtrem wstępnym klasy G3) (można przyjąć, że filtr klasy G3 według klasyfikacji zamieszczonej w normie PN-EN 779:2005, odpowiada filtrowi zgrubnemu klasy ISO Coarse >35% zgodnie z klasyfikacją PN-EN ISO 16890-1:2017-01/Ap1:2019-04) – w podziemnych, murowanych przewodach wentylacyjnych. Zauważono, że wzrost liczebności drobnoustrojów mógł wynikać ze wcześniejszego zasiedlenia przewodów (czemu sprzyjało zawilgocenie przewodów oraz znajdujące się w osadzonym pyłe fragmenty roślin, owadów) i ich uwolnienia do powietrza w czasie pomiarów. Uzyskana w pomiarach liczba mikroorganizmów w powietrzu wentylacyjnym, na całej długości instalacji, nie przekraczała jednak wartości wskazanych w tabeli 2 jako dopuszczalne w instalacji wentylacyjnych sal operacyjnych. Co ciekawe, stwierdzono 5-krotne obniżenie liczby drobnoustrojów za nagrzewnicą powietrza, co mogło być skutkiem przegrzania i osuszenia powietrza podczas przepływu przez to urządzenie. Kaiser i Wolski (2007) zaobserwowali także, że przewody wentylacyjne i tłumiki hałasu oraz filtry o zbyt długim czasie eksploatacji mogą być źródłem wtórnej emisji drobnoustrojów. Kaiser (2020) zauważył, że nie bez znaczenia dla otrzymanych wyników było wykonanie pomiarów w ziemie, czyli określenie o niskim poziomie zanieczyszczenia powietrza grzybami pleśniowymi.

Kaiser i Wolski (2007) zaobserwowali większe stężenie drobnoustrojów w instalacji wywiewnej z sal operacyjnych w porównaniu z instalacją nawiewną. W swoim artykule autorzy zasugerowali, że mikroorganizmy pochodzące z sali operacyjnej (usuwane przez system wywiewny) są potencjalnie bardziej niebezpieczne dla zdrowia niż występujące w powietrzu nawiewnym. Odpowiedzią na to jest obecna praktyka projektowa wykluczająca stosowanie recyrkulacji powietrza w komorach mieszania w centralach wentylacyjno-klimatyzacyjnych. Stosowana jest natomiast recyrkulacja powietrza realizowana w modułach cyrkulacyjnych w tej samej sali operacyjnej, z której

pochodzi powietrze recyrkulacyjne, bez mieszania z powietrzem z innych pomieszczeń, z wymaganiami dotyczącymi dwustopniowej filtracji powietrza, z filtrem wysokoskutecznym o minimalnej klasie H13 włącznie (Charkowska i in., 2018).

Badania instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych w szpitalach na świecie

W literaturze światowej zagadnienia dotyczące jakości mikrobiologicznej powietrza w szpitalach są poruszane najczęściej w kontekście efektywności stosowanej instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnej, a prowadzone badania mikrobiologiczne koncentrują się na liczebności mikroorganizmów wykrywanych w powietrzu w salach operacyjnych i w innych pomieszczeniach szpitalnych. Liczba badań czystości mikrobiologicznej instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnej szpitali jest bardzo niewielka.

Totaro i in. (2019) przebadali w dwóch szpitalach instalacje wentylacyjne wyposażone w rotacyjne osuszacze adsorpcyjne, obsługujące blok operacyjny i sale intensywnej terapii. Celem badań była ocena skuteczność strategii dezynfekcji powietrza w tych systemach. W instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnej bloku operacyjnego przed dezynfekcją ogólne liczby bakterii psychro – i mezofilnych wynosiły odpowiednio 24÷130 jtk/m³ i 4÷26 jtk/m³, a grzybów – 6÷36 jtk/m³. W instalacji doprowadzającej powietrze do sal intensywnej opieki medycznej liczebność tych mikroorganizmów wynosiła odpowiednio 22÷32 jtk/m³, 12÷14 jtk/m³ i 10÷32 jtk/m³. W swojej pracy Totaro i in. (2019) nie przedstawili szczegółowo wyników pomiarów dla kolejnych lokalizacji punktów pomiarowych, nie wskazali też urządzeń wentylacyjnych o szczególnym znaczeniu dla pogorszenia czystości powietrza. Zauważono jedynie, że pomimo, że zastosowane rotory sorpcyjne umożliwiają osuszenie powietrza, a wysokie temperatury zapobiegają występowaniu zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza, przed dezynfekcją zaobserwowano obecność *Aspergillus fumigatus* w nawiewniku powietrza do pomieszczenia na jednym z oddziałów intensywnej terapii (12 jtk/m³).

Ohsaki i in. (2007) prowadzili badania dotyczące źródła skażenia powietrza wewnętrznego szpitala klinicznego bakteriami z rodzaju *Bacillus* po przeprowadzonym remoncie. Szpital był wyposażony w system wentylacyjny z urządzeniami klimatyzacyjnymi, zapewniającymi wentylację oraz ogrzewanie i chłodzenie po-

wietrza. W przestrzeni technicznej nad stropem podwieszanym każdej sali i korytarza znajdowały się przewody nawiewne i wywiewne oraz klimatyzatory pracujące na powietrzu obiegowym. Powietrze zewnętrzne dostawało się przez dachową czepnię powietrza wyposażoną w filtry, a następnie było rozprowadzane przez system wentylacji. Każdy klimatyzator był wyposażony w prosty jednowarstwowy filtr powietrza wykonany z siatki z włókien syntetycznych. Bakterie *Bacillus cereus* zostały wyizolowane z kurzu i z dwóch z 10 używanych kraników trójdrożnych znajdujących się na stole pod nawiewnikiem. Autorzy wskazali dwa prawdopodobne źródła skażenia powietrza bakteriami z rodzaju *Bacillus*: filtry systemu klimatyzacji oraz nawiewniki i wywiewniki w systemie wentylacji, w których zaobserwowano duże ilości pyłu.

Legionella w instalacjach wentylacyjno-klimatyzacyjnych szpitali

Jednym z poruszanych problemów dotyczących zakażeń szpitalnych jest występowanie bakterii *Legionella* spp. w szpitalach. Ryzyko zakażenia *Legionella* spp. jest powiązane z aerozolami wytwarzanymi z zanieczyszczonych źródeł wody. Za 80-90% zachorowań na legionelozę odpowiada *Legionella pneumophila*, a z tego gatunku szczep serogrupa 1 bakterii powoduje 60-90% zachorowań (Łopaciuk i Tukendorf, 2009). Wywołana przez nie choroba – Legionelozę – jest ujęta w wykazie zakażeń i chorób zakaźnych w ustawie o zapobieganiu oraz zwalczaniu zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi (Dz.U. 2024 poz. 924).

Fang i in. (2023) zaznaczyli, że *Legionella pneumophila* może rosnąć i rozmnażać się w temperaturach od 25°C do 45°C, optymalny zakres temperatury wynosi od 32°C do 42°C. *L. pneumophila* może przeżyć kilka godzin w temperaturze 50°C, przestaje się rozmnażać, gdy temperatura spadnie poniżej 20°C. Na mocy Rozporządzenia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294) obowiązkowa jest kontrola wody ciepłej w przedsiębiorstwach wykonujących działalność leczniczą w rodzaju stacjonarnych i całodobowych świadczeń zdrowotnych. Określona została częstotliwość pobierania próbek (2 razy w roku) i wartość dopuszczalna wynosząca 100 jtk/100 ml. W przypadku hospitalizacji pacjentów o obniżonej odporności, w tym objętych leczeniem immunosupresyjnym, wartość ta jest znacznie

zaostrzona (<50 jtk/1000 ml). Dla wody w nawilżaczach wodnych w systemach klimatyzacji nie określono analogicznych wymagań. Natomiast w dokumencie Eurovent 9/7 (2011) dla wody w urządzeniach chłodzących z bezpośrednim odparowaniem i z wodą recyklującą określono dopuszczalną liczebność bakterii *Legionella* jako 1000 jtk/l (100 jtk/100 ml).

Występowanie bakterii *Legionella pneumophila* w obiektach szpitalnych zostało omówione w pracach m.in. Torre i in. (2014), Zang i in. (2015), Mendes Almeida (2017), Montagna i in. (2017), Chawla i in. (2023), Fang i in. (2023), Lombardi i in. (2023). Większość publikacji dotyczy analizy próbek wody pochodzących z różnych instalacji wodnych w budynkach opieki zdrowotnej. Torre i in. (2014), Zang i in. (2015) oraz Lombardi i in. (2023) przedstawili informacje o badaniu wody i pyłu pobranego z instalacji HVAC w kierunku występowania bakterii *Legionella*.

Lombardi i in. (2023) zauważyli, że w placówkach opieki zdrowotnej obecność *Legionelli* wiąże się ze skażonymi zbiornikami wody, wieżami chłodniczymi i systemami klimatyzacji. Z ogólnej liczby 3365 próbek wody, 2065 pochodziło z kranów i natrysków (1485 z wody ciepłej i 580 z wody zimnej), 780 z dna zbiorników (w szczególności 520 z wodą ciepłą i 260 z wodą zimną) oraz 520 z centrali wentylacyjno-klimatyzacyjnej. Uzyskano następujące odsetki dodatnich wyników: 19,7% dla dna zbiorników, 25,9% dla kranów i pryszniców oraz 3,7% dla centrali wentylacyjnej. W badaniach Torre i in. (2014) przeprowadzonych w latach 2008–2014 w 50 szpitalach regionu Kampania uzyskano odsetek dodatnich wyników na poziomie 27,2% dla dna zbiorników, 31,9% dla kranów i pryszniców oraz 4,0% dla centrali wentylacyjno-klimatyzacyjnych. W trakcie badań zaobserwowano spadek częstotliwości występowania bakterii *L. pneumophila* w próbkach od 43,8% w 2008 r. do 22,9% w 2012 r. Zarówno w pracy Lombardi i in. (2023), jak i Torre i in. (2014), nie podano, z jakiego miejsca w centralach wentylacyjno-klimatyzacyjnych pobrano próbki wody do analizy.

Fang i in. (2023) przeprowadzili badania w celu oceny częstości występowania skażenia przez bakterie *L. pneumophila* wody pochodzącej z instalacji wodnych. Nie analizowali obecności tej bakterii w pyłe czy w powietrzu w instalacjach wentylacyjnych. Łączna częstość występowania *L. pneumophila* w zbiorniku ciepłej wody (47,6%) i wodzie pod prysznicem (36,2%) była najwyższa, następnie

w wodzie wodociągowej (32,5%) i chłodni kominowej (29,6%) oraz w zbiorniku na wodę zmieszaną (25,3%) i wodę zimną (21,3%). Łączna częstość występowania badań w różnych krajach również znacznie się różniła. Częstość występowania *L. pneumophila* w krajach rozwiniętych była wyższa niż w krajach rozwijających się (odpowiednio 45,2% i 33,2%).

Dla porównania z wynikami uzyskanymi w szpitalach przez Torre i in. (2014), Fanga i in. (2023), Lombardi i in. (2023), poniżej przywołano wyniki przedstawione przez Lin i in. (2010), którzy analizowali transmisję bakterii w centralnym systemie wentylacji i klimatyzacji w instalacjach w budynkach użyteczności publicznej. Dodatni poziom *Legionella pneumophila* w osadach, wodzie chłodzącej, aerozolu w pobliżu wieży chłodniczej, pyłe na powierzchni przewodów wentylacyjnych i powietrzu w pomieszczeniach wynosił odpowiednio: 100% (9/9), 78,6% (11/14), 25,4% (17/67), 16,7% (2/12) i 17,3% (13/75). Podobnie Zhang i in. (2015) wykryli obecność *Legionella pneumophila* w 66,7% pobranych próbek pyłu z przewodów wentylacyjnych centralnego systemu wentylacji i klimatyzacji (tj. w 20 próbkach z pobranych 30) ze średnią liczebnością 6212 jtk/g pyłu.

Z kolei Mendes Almeida (2017) przez 2 lata prowadziła badania pod kątem obecności *Legionella pneumophila* w systemach wentylacyjno-klimatyzacyjnego szpitala. Bakterii nie wykryto w żadnej z 12 próbek kondensatu z przewodów ani w żadnej z 12 próbek wymazów z central obsługujących pięć sal operacyjnych na oddziale chirurgii ogólnej i salę nadzoru poznieczuleniowego. W pracy Chawla i in. (2023) zauważono, że *Legionella pneumophila* jest patogenem wywołującym poważne obawy o zdrowie osób w pomieszczeniach zamkniętych, gdyż może łatwo wystąpić w postaci aerozolu pochodzącego z kranów w łazienkach lub zlewozmywakach, głowic prysznicowych, wanien, instalacji wodno-kanalizacyjnych w różnych placówkach opieki zdrowotnej. Podobnie Gładysz i in. (2021) zaznaczyli, że głównymi źródłami skażenia bakterią *Legionella pneumophila* w szpitalach i innych placówkach opieki zdrowotnej są instalacje wodociągowe, kran, prysznic i urządzenia medyczne zasilane wodą. Wśród źródeł nie wymieniono elementów systemów wentylacji i klimatyzacji.

W publikacji Magnuszewskiej i Regulskiej (2011) zamieszczono analizę badań wskazujących na ryzyko zachorowań na legionelozę wśród hospitalizowanych dzieci. Próbkę wody pobrano z instalacji wodo-

ciągowej (podgrzewacze, punkty czerpalne: kran, prysznic), komory zraszania w centrali klimatyzacyjnej oraz z respiratora. W trzech z pięciu badanych szpitali stwierdzono obecność bakterii z rodzaju *Legionella* w instalacji ciepłej wody (w 17% próbek bardzo wysoką liczebność: od $1,2 \times 10^3$ jtk/100 ml do $2,2 \times 10^4$ jtk/100 ml). W 74,0% próbek została przekroczona dopuszczalna liczba tych bakterii wskazana w Rozporządzeniu (Dz.U. 2017 poz. 2294) jako brak lub znikome skażenie, czyli 100 jtk/100 ml. W jedynej próbce wody pobranej z komory zraszania (woda z wanny pod komorą) liczba bakterii *Legionella pneumophila* sg 2-14 była bardzo wysoka: $3,1 \times 10^2$ jtk/100ml i ponad trzykrotnie przekracza wartość podaną w dokumencie Eurovent 9/7 (2011).

Należy zauważyć, że ze względu na zagrożenie dla zdrowia osób przebywających w klimatyzowanych pomieszczeniach wynikające z możliwości rozwoju drobnoustrojów w wodzie stosowanej do nawilżania, obecnie stosowanie nawilżania wodnego w systemach klimatyzacji budynków opieki zdrowotnej jest niezalecane. Wymagane jest stosowanie nawilżania parowego (Charkowska i in., 2018; DIN 1846-4:2018). Kaiser (2013) stwierdził, że ze względu na wysoką temperaturę czynnika, stosowanie nawilżaczy parowych, wyjąwszy takie sytuacje jak np. niewłaściwa eksploatacja lub awaria, wyklucza występowanie bakterii *Legionella* w nawilżonym przez parę wodną powietrzu.

Maheshwar (2017) zauważył, że bakterie *Legionella pneumophila* nie mogą przetrwać bez wody, a prawidłowo obsługiwany i utrzymywany system HVAC raczej nie będzie źródłem problemów, chyba że do systemu dostanie się woda zanieczyszczona bakteriami. Dodaj, że urządzenia klimatyzacyjne bez nawilżaczy nie zostały zidentyfikowane jako źródła bakterii *Legionella pneumophila*. Aby zakażenia tą bakterią można było bezpośrednio powiązać z systemem HVAC, woda skażona bakteriami *Legionella pneumophila* musi przedostać się do systemu wentylacyjnego, zostać przetworzona w aerozol i w takiej postaci dostarczona do układu oddechowego użytkowników budynku.

Prussin i in. (2017) donoszą, że badania nad występowaniem i przenoszeniem bakterii *Legionella* przez systemy wentylacji i klimatyzacji są ograniczone. Odnosząc się do instalacji w budynkach mieszkalnych, zwracają uwagę na możliwość wystąpienia bakterii *Legionella* w wodzie w wannach ociekowych chłodnic w okresie letnim, szczególnie w przypadku, gdy nie są one często czyszczone. Natomiast

w publikacji WHO (2007) podkreślono, że bakterie *Legionella* nie przeżywiają suszenia, dlatego skropliny z urządzeń klimatyzacyjnych, które często całkowicie odparowują z powierzchni, na której się znajdują, nie są ich prawdopodobnym źródłem.

W centralach wentylacyjno-klimatyzacyjnych obsługujących obiekty ochrony zdrowia stosuje się dwa lub trzy stopnie filtracji powietrza (ostatni, trzeci filtr, w nawiewnikach w salach operacyjnych i pozostałych pomieszczeniach czyste w blokach operacyjnych) (Charkowska i in., 2018, DIN 1946-4:2018). Filtr 2. stopnia, umieszczony jako ostatnie urządzenie w centrali, klasy ISO ePM₁ ≥80%, klasyfikowany zgodnie z normą PN-EN ISO 16890-1:2017, zatrzyma ze skutecznością 80÷90% zanieczyszczenia o wymiarach do 1 µm, a cząstki większe o wymiarach do 2,5 µm ze skutecznością 85÷95%, do 10 µm ze skutecznością 90÷100% (Eurovent 4/23 – 2022). Filtry 3. stopnia wysokoskuteczne klasy H13 ze skutecznością co najmniej 99,95% zatrzymują zanieczyszczenia o wymiarze 0,3 µm (PN-EN 1822-1:2019). Biorąc pod uwagę, że bakterie *Legionella* mają wymiary od 2 do 20 µm (Winn, 1996), powinny zostać zatrzymane z bardzo wysoką skutecznością na filtrach doprowadzających powietrze do pomieszczeń z mniejszymi wymaganiami pod względem czystości powietrza oraz przez filtry wysokoskuteczne umieszczone w nawiewnikach powietrza do sal czystych w szpitalach.

Jakość powietrza w pomieszczeniach szpitalnych

Stężenia bioaerozoli różnią się w zależności od obszaru szpitala i wynoszą od 10¹ do 10³ jtk/m³ w salach szpitalnych (w tym w łazienkach), i 1÷10 jtk/m³ na oddziałach intensywnej terapii i oddziałach intensywnej opieki medycznej. Pertegal i in. (2023a, b) przeanalizowali dane literaturowe dotyczące średniego stężenia mikroorganizmów unoszących się w powietrzu pomieszczeń szpitalnych. Podwyższone stężenie bakterii w powietrzu, dochodzące do 3·10³ jtk/m³ odnotowano tylko na oddziale SOR, czyli w najmniej restrykcyjnym i najbardziej ruchliwym obszarze szpitala. W oddziałach intensywnej terapii i w bloku chirurgicznym liczba bakterii w powietrzu wynosiła odpowiednio 2,0·10² jtk/m³ i 4,0·10² jtk/m³, a w bloku położniczym 5,6·10² jtk/m³. Średnie stężenia grzybów wynosiły 8,2·10² jtk/m³ w izbach przyjęć, 3,8·10² jtk/m³ w pokojach pielęgniarskich,

3,2·10² jtk/m³ w gabinetach lekarskich, 2,8·10² jtk/m³ w bloku położniczym, 1,9·10² jtk/m³ w bloku chirurgicznym i 1,4·10³ jtk/m³ w oddziale specjalnym.

Pertegal i in. (2023b) od stycznia 2019 r. do grudnia 2021 r. przeprowadzili badania mikrobiologicznej jakości powietrza w salach chorych i łazienkach w szpitalach w Hiszpanii. W ramach badań określali liczebność mikroorganizmów w powietrzu w kontrolowanych pomieszczeniach i identyfikowali potencjalnie patogenne gatunki bakterii i grzybów. W powietrzu najczęściej obecne były rodzaje *Staphylococcus*, *Micrococcus* i *Bacillus* ze średnim odsetkiem wynoszącym odpowiednio 35, 16 i 13%. W powietrzu pomieszczeń szpitalnych występowały także bakterie z rodzajów *Pseudomonas* (średnio 7%), *Acinetobacter* (6%), *Enterococcus*, *Klebsiella*, *Kocuria* i *Enterococcus* (każdy rodzaj około 3%), oraz *Citrobacter*, *Corynebacteria*, *Eikenella*, *Lactobacillus* i *Pausteurella* (po 1%). Głównym rodzajem grzybów w szpitalnym powietrzu wewnętrznym był *Aspergillus* (34%), następnie *Penicillium* (31%) i *Cladosporium* (14%). Pozostałe rodzaje grzybów występujących w powietrzu szpitalnym to *Alternaria*, *Candida*, *Fusarium* i *Rhodotorula* (każdy <10%). Podobne wyniki uzyskali także Araujo i in. (2008), którzy zauważyli, że w szpitalach dominującymi rodzajami grzybów są *Aspergillus* i *Penicillium*. W innych budynkach przeważały grzyby z rodzaju *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus* i *Alternaria* oraz drożdżaki. W badaniach Bayer i in. (2000) wykazano, że w systemach wentylacji i klimatyzacji obsługujących budynki o różnym przeznaczeniu przeważały grzyby z rodzaju *Cladosporium* i *Penicillium*. Powyższe badania (Pertegal i in. 2023b; Araujo, 2008; Bayer 2000) wykazały, że zarówno w szpitalnym powietrzu wewnętrznym, jak i w instalacjach klimatyzacyjno-wentylacyjnych szpitali, najczęściej obecne były bakterie z rodzajów *Staphylococcus*, *Micrococcus* i *Bacillus* oraz w mniejszym stopniu *Pseudomonas*, natomiast spośród grzybów dominowały rodzaje *Aspergillus*, *Penicillium* i *Cladosporium*. Wyniki te wskazują na zależność pomiędzy mikroorganizmami zasiedlającymi systemy wentylacji i klimatyzacji a jakością powietrza wewnętrznego w salach szpitalnych, szczególnie w odniesieniu do występujących tam grzybów.

W opracowaniu Instytutu Medycyny Pracy „Grzyby pleśniowe jako składnik bioaerozolu” za najbardziej niebezpieczne dla ludzi gatunki wskazano te należące do rodzaju *Aspergillus*, m.in. *A. flavus* i *A. fumigatus*. U osób z obniżoną odpornością immunologiczną mogą one wywołać

infekcje, takie jak grzybicze zapalenie płuc lub grzybicę innych organów i układów (aspergiloza), alergie i zatrucia mykotoksynami. Z kolei rodzaj *Penicillium* obejmuje ponad 300 gatunków, z których głównym gatunkiem wytwarzającym mykotoksynę (ochratoksynę) jest *P. verrucosum*. *P. oxalicum* i *P. citrinum* mogą powodować astmę, reaktywność skóry, zapalenie płuc lub alergie oddechowe. Zarodniki *Cladosporium* są silnym alergenem, a u osób chorujących na astmę i inne choroby układu oddechowego mogą znacznie zaostrzać przebieg choroby. Gutarowska (2010) zauważyła, że u 80% pacjentów z astmą występowała nadwrażliwość alergiczna na pleśnie *Alternaria* i *Cladosporium*, a 25% pacjentów z astmą wykazyuje alergie na grzyby *Aspergillus*.

Nieodpowiednia wentylacja pomieszczeń jest powiązana z dużą liczbą zakażeń szpitalnych, które są spowodowane oportunistycznym przenoszeniem potencjalnie patogennych bioaerozoli drogą powietrzną. Badania literaturowe przeprowadzone przez Pertegala (2023b) wykazały, że średnie stężenie mikroorganizmów w powietrzu w różnych obszarach szpitali zależało od zastosowanych systemów wentylacji. W obszarach szpitalnych z klasyczną wentylacją mechaniczną najwyższe stężenia bioaerozolu (1,49·10³ jtk/m³) były wyższe niż w obszarach z wentylacją naturalną (6,51·10² jtk/m³). Najniższe średnie całkowite stężenia bioaerozoli wynoszące 9,50·10¹ jtk/m³ stwierdzono w przypadku stosowania nowoczesnych systemów wentylacji mechanicznej sal operacyjnych z przepływem laminarnym oraz dodatkową wymianą powietrza i/lub filtrami HEPA.

Podsumowanie

Analiza zawartości grzybów pleśniowych i bakterii w powietrzu instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych w szpitalach w ciepłym i zimnym okresie roku pozwala na określenie zagrożenia związanego z obecnością tych mikroorganizmów. Ze względu na możliwość rozwoju chorób u pacjentów, celowe jest zwrócenie uwagi na obecność pleśni takich jak *Aspergillus*, *Penicillium* i *Cladosporium*, jak również bakterii z rodzajów *Staphylococcus*, *Micrococcus* i *Bacillus* oraz w mniejszym stopniu – *Pseudomonas*.

Badanie zmienności jakości mikrobiologicznej powietrza na całej długości instalacji z uwzględnieniem zmian sezonowych wynikających z różnych warunków zewnętrznych umożliwia określenie najbardziej newralgicznych miejsc lub urządzeń

wentylacyjnych w systemie. Wiedza o możliwości zasiedlenia przez drobnoustroje np. filtrów powietrza i tłumików hałasu oraz warstwy pyłu na powierzchni przewodów i tacek ciekowych ze skroplinami pozwala na skuteczniejszą kontrolę czystości poszczególnych elementów instalacji, a tym samym uzyskanie najlepszych efektów w zakresie higieny instalacji.

Zgodnie z najnowszymi wymaganiami w zakresie przeglądów instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, wynikającymi z przepisów Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, Rozporządzenia Dz.U. 2023 poz. 739 oraz normy PN-EN 16798-17:2017-07, wśród których wymieniono ocenę jakości powietrza wewnętrznego i kontrolę czystości instalacji i poszczególnych urządzeń, baczność należy zwracać na potencjalne zagrożenie stanu zdrowia pacjentów w przypadku zasiedlenia urządzeń i instalacji przez chorobotwórcze mikroorganizmy napływające wraz z powietrzem wentylacyjnym do pomieszczeń w obiektach ochrony zdrowia. Pomocna będzie w tym wiedza o urządzeniach wentylacyjnych najbardziej podatnych na zasiedlenie przez drobnoustroje oraz rodzajach grzybów pleśniowych i bakterii, na które szczególnie należy zwrócić uwagę.

Ograniczona liczba publikacji zawierających wyniki badań czystości instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych w obiektach ochrony zdrowia na całej ich długości, z analizą sezonową i uwzględnieniem najważniejszych drobnoustrojów, wskazuje na konieczność poszerzenia wiedzy na temat zanieczyszczeń mikrobiologicznych w powietrzu, w pyłe i w skroplinach w oparciu o jak najszersze i jak najliczniejsze badania w tym kierunku. Systemy wentylacji mechanicznej i klimatyzacji mają zapewnić właściwą jakość powietrza w pomieszczeniach, mogą one jednak również być głównymi źródłami zanieczyszczeń mikrobiologicznych, a w rezultacie nasilać zakażenia szpitalne. Konieczne jest także określenie wartości dopuszczalnych i bezpiecznych liczby drobnoustrojów (ze zwróceniem uwagi na rodzaje) w powietrzu, pyłe i w skroplinach szpitalnych instalacji klimatyzacyjno-wentylacyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Al-Abdalal A.H., Al-Dakheel A.S., Al-Abkari H.A., Impact of Air-Conditioning Filters on Microbial Growth and Indoor Air Pollution, in book: Energy-efficient and Sustainable Buildings, Published: 06 September 2019, DOI: 10.5772/intechopen.88548, <https://www.intechopen.com/chapters/68598#> (Dostęp: 1.08.2024).
- [2] Araujo R., Cabral J.P., Gonçalves Rodrigues A., Air filtration systems and restrictive access conditions improve indoor air quality in clinical units: *Penicillium* as a general indicator of hospital indoor fungal levels, *American Journal of Infection Control*, Volume 36, Issue 2, 2008, Pages 129-134, ISSN 0196-6553, <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2007.02.001>.
- [3] Asif A., Zeeshan M., Hashmi I., Zahid U., Bhatti M.F., Microbial quality assessment of indoor air in a large hospital building during winter and spring seasons, *Building and Environment*, 135 (2018), pp. 68-73.
- [4] Augustowska M., Dutkiewicz J., 2006. Variability of airborne microflora in a hospital ward within a period of one year. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13 (1), 99-106.
- [5] Bayer Ch.W., Crow S.A., Fischer J., Causes of Indoor Air Quality Problems in Schools – Summary of Scientific Research, SEMCO, Inc., Columbia, Mo., May 2000.
- [6] Bonadonna L., Briancesco R., Coccia A.M., Meloni P., Rosa G.L., Moscato U., Microbial Air Quality in Healthcare Facilities, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18, 6226. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126226>
- [7] Božić J., Ilić P., Ilić S., Indoor Air Quality in the Hospital: The Influence of Heating, Ventilating and Conditioning Systems, *Brazilian Archives of Biology and Technology*. Vol.62: 1-11, 2019.
- [8] Burge H., Bioaerosols: prevalence and health effects in the indoor environment. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 86 (1990), pp. 686-701.
- [9] Chang C.S., Foorde K.K., VanOsdell D.W., Assessment of fungal (*Penicillium chrysogenum*) growth on three HVAC duct materials, *Environment International*, 22 (4) (1996) 425-431.
- [10] Charkowska A., Concentration of micro-organisms in hospital air-conditioning systems – comparison between winter and summer conditions, 7th World Congress Clima 2000, Napoli, 15-18 September 2001 (CD).
- [11] Charkowska A., Contamination in Hospital Air-Conditioning Systems, The 6th International Conference on Healthy Buildings, Healthy Buildings 2000, Helsinki, 6-10.08.2000, Proceedings, Vol. 2: Design and Operation of HVAC Systems, p. 193-198.
- [12] Charkowska A., Różycki A., Lenarski R., Sobierajska A., Wytyczne projektowania, wykonania, odbioru i eksploatacji systemów wentylacji i klimatyzacji dla podmiotów wykonujących działalność leczniczą. Wyd. Pracodawcy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa; 2018, <https://www.gov.pl/web/zdrowie/materialy-pomocnicze>
- [13] Charkowska A., Tłumiki hałasu – wtórne źródła zanieczyszczenia powietrza w instalacjach klimatyzacyjnych?, *Instal*, nr 10, 2002a, s. 18-21.
- [14] Charkowska A., Zanieczyszczenie mikrobiologiczne instalacji klimatyzacyjnych w szpitalu, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, nr 6, 2002b, s. 16-24, 34.
- [15] Chawla H., Anand P., Garg K. i in.. A comprehensive review of microbial contamination in the indoor environment: sources, sampling, health risks, and mitigation strategies. *Frontiers in Public Health*. 2023;11:1285393. Published 2023 Nov 23. doi:10.3389/fpubh.2023.1285393.
- [16] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [17] EUROVENT 4/23 – 2022: Dobór klas filtrów powietrza do wentylacji ogólnej sklasyfikowanych według PN-EN ISO 16890.
- [18] EUROVENT 9/7 – 2011, Guidelines for the Prevention of Uncontrolled Bacteriological Contamination, including Legionella Pneumophila, in Cooling Towers and Evaporative Condensers, Published by EUROVENT, Brussels.
- [19] Fang Z., Zhou X., Liao H.; Xu H., A meta-analysis of Legionella pneumophila contamination in hospital water systems, *American Journal of Infection Control*, 2023-11, Vol.51 (11), p.1250-1262.
- [20] Forthomme A., Joubert A., Andrès Y., Simon X., Duquenne P., Bemer D., Le Coq L., Microbial aerosol filtration: Growth and release of a bacteria-fungi con – sortium collected by fibrous filters in different operating conditions, *Journal of Aerosol Science* 72 (2014) 32-46.
- [21] Gladysz I., Sikora A., Wójtowicz-Babin M., Karczewski J., Legionella spp. in Polish hospitals in 2009-2013 and 2014-2016: An epidemiological analysis. *Advances in Hygiene and Experimental Medicine*. (2021);75(null):85-90. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.7249>.
- [22] Grzyby pleśniowe jako składnik bioaerolu i ich szkodliwość dla ludzi, Zadanie realizowane za środków Narodowego Programu Zdrowia na lata 2021-2025, finansowane przez Ministra Zdrowia, <https://pracanazdrowie.pl/grzyby-pleśniowe-i-ich-szkodliwosc-dla-ludzi/> (dostęp: 14.10.2023r.).
- [23] Guo K., Qian H., Zhao D., Ye J., Zhang Y., Kan H., Zhao Z., Deng F., Huang C., Zhao B., Indoor exposure levels of bacteria and fungi in residences, schools, and offices in China: a systematic review. *Indoor Air*, 30 (6) (2020), pp. 1147-1165.
- [24] Gutarowska B., Grzyby strzępkowe zasiedlające materiały budowlane wzrost oraz produkcja mikotoksyn i alergenów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 1074*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2010 https://cybra.lodz.pl/Content/9507/BGutarowska_GrzybyStrzepakoweZasiedlajaceMaterialy_2010.pdf (dostęp: 15.09.2023r.)
- [25] Hassan A., Zeeshan M., Microbiological indoor air quality of hospital buildings with different ventilation systems, cleaning frequencies and occupancy levels, *Atmospheric Pollution Research*, Volume 13, Issue 4, 2022, 101382, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101382>.
- [26] Hayleyesus S.F., Manaye A.M., 2014. Microbiological quality of indoor air in university libraries. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 4 (Suppl. 1):S312-S317. <http://dx.doi.org/10.12980/APJTB.4.2014C807>.
- [27] Hospodsky D., Qian J., Nazaroff W.W., Yamamoto N., Bibby K., Rismani-Yazdi H., Peccia J., 2012. Human occupancy as a source of indoor airborne bacteria. *PLoS One* 7 (4). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0034867>.
- [28] Hospodsky D., Yamamoto N., Nazaroff W., Miller D., Gorthala S., Peccia J., Characterizing airborne fungal and bacterial concentrations and emission rates in six occupied children's classrooms. *Indoor Air*, 25 (6) (2015), pp. 641-652.
- [29] Hugenholz P., Fuerst J.A., Heterotrophic bacteria in an air-handling system, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 58, No. 12, Dec. 1992, p. 3914-3920
- [30] Jahnz-Różyk K., Wprowadzenie do alergii na antygeny grzybów pleśniowych, *Polski Merkuriusz Lekarski*, 2008, XXIV, Supl. 1, 7.
- [31] Kaiser K., Legionella w wewnętrznych instalacjach wodociągowych, *Rynek Instalacyjny*, 1-2/2013, s. 79-83.
- [32] Kaiser K., Mikroorganizmy a systemy klimatyzacji i wentylacji. Część 2, *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna*, 10-12/2020, s. 169-183.
- [33] Kaiser K., Wolski A., Bioaerol w sali operacyjnej i instalacji klimatyzacyjno – wentylacyjnej. *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna*, nr 11, 2006a, str. 431-437.
- [34] Kaiser K., Wolski A., Klimatyzacja i wentylacja w szpitalach. Teoria i praktyka eksploatacji, MASTA, Gdańsk, 2007.
- [35] Kaiser K., Wolski A., Wpływ zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza dostarczanego przez systemy klimatyzacji – wentylacji na standard mikrobiologiczny pomieszczeń czystych, *Instal*, nr 9, 2006b, s. 58-63.

- [36] Li Y., Leung G.M., Tang J., Yang X., Chao C., Lin J.Z., Lu J., Nielsen P.V., Niu J., Qian H., Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*, 17 (1) (2007), pp. 2–18.
- [37] Liu Z., Ma S., Cao G., Meng C., He B.-J., 2018. Distribution characteristics, growth, reproduction and transmission modes and control strategies for microbial contamination in HVAC systems: a literature review. *Energy & Buildings*, 177, 77–95.
- [38] Łopaciuk U., Tukendorf A., *Legionella pneumophila*, *Medycyna po dyplomie*, 9/2015 <https://podyplomie.pl/medycyna/19127/legionella-pneumophila> (Dostęp: 20.07.2024).
- [39] Maus R., Goppelsröder A., Umhauer H., Survival of bacterial and mold spores in air filter media, *Atmospheric Environment*, 35 (1) (2001) 105–113.
- [40] Maus R., Goppelsröder A., Umhauer H., Viability of bacteria in unused air filter media, *Atmospheric Environment*, 31 (15) (1997) 2305–2310.
- [41] Mazurkiewicz-Zapałowicz K., Goliński A., Wolska M., Grzyby alergenne w bioaerolu, *Kosmos Problemy Nauk Biologicznych*, Tom 65, 2016, Numer 4 (313), s. 647–655 <http://kosmos.icm.edu.pl/PDF/2016/647.pdf> (dostęp: 8.09.2023r.).
- [42] Memarzadeh F., Weiran X., Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of air borne pathogens, *Building Simulation*, 2012;5:15–8, <https://doi.org/10.1007/s12273-011-0053-4>.
- [43] Mendes Almeida B.L., Microbiological Assessment of Air and Surfaces of Surgery Rooms from a Lisbon Hospital, 2017, Monografia de Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas apresentada à Universidade de Lisboa através da Faculdade de Farmácia, https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/35978/1/MICF_Beatriz_Almeida.pdf (dostęp: 16.09.2023r.).
- [44] Mentese S., Mirici N.A., Otkun M.T., Bakar C., Palaz E., Tasdibi D., Cevzici S., Cotuker O., Association between respiratory health and indoor air pollution exposure in Canakkale, Turkey, *Building and Environment*, 93 (2015), pp. 72–83.
- [45] Miller J.D. (1992) Fungi as Contaminants in Indoor Air. *Atmospheric Environmental*, 26, 2163–2172. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90404-9](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90404-9).
- [46] Montagna M.T., De Giglio O., Cristina M.L., Napoli C., Pacifico C., Agodi A., in., Evaluation of Legionella air contamination in healthcare facilities by different sampling methods: An Italian multicenter study, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, (2017) 14:670. DOI: 10.3390/ijerph14070670
- [47] NAAD-21-Guidance, Part 2: AIR (Indoor Air Quality) Regulation Guidance standards for Indoor Air Quality in Occupied Zones, 2021.
- [48] NADCA 01, Mechanical Cleaning of Non-Porous Air Conveyance System Components, An Industry Standard Developed by the National Air Duct Cleaners Association, 1992 Edition.
- [49] Napoli C., Tafuri S., Montenegro L., Cassano M., Notarnicola A., Lattarulo S., Montagna M., Moretti B., 2012. Air sampling methods to evaluate microbial contamination in operating theatres: results of a comparative study in an orthopaedics department. *Journal of Hospital Infection*, 80 (2), 128–132.
- [50] Nasir Z.A., Mula V., Stokoe J., Colbeck I., Loeffler M., Evaluation of total concentration and size distribution of bacterial and fungal aerosol in healthcare built environments, *Indoor and Built Environment*, 2015. 24 (2), 269–279.
- [51] Nevalainen A., Taubel M., Hyvärinen A., Health effects of fungi, bacteria and other bioparticles J.S. Pastuszka (Ed.), *Synergic Influence of Gaseous, Particulate, and Biological Pollutants on Human Health*, Taylor & Francis Group (2015), pp. 176–184.
- [52] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 23 maja 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o zapobieganiu oraz zwalczaniu zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi, Dz.U. 2024 poz. 924.
- [53] Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2022 poz. 1225.
- [54] Ohsaki Y., Koyano S., Tachibana M., Shibukawa K., Kuroki M., Yoshida I., Ito Y., Undetected *Bacillus pseudo-outbreak* after renovation work in a teaching hospital. *Journal of Infection*, 2007, 54, 617–622.
- [55] Pasanen P., Pasanen A.-L., Jantunen M., Water Condensation promotes Fungal Growth in Ventilation Ducts, *Indoor Air*, 1993, 3: 106–112.
- [56] Pertegal V., Lacasa E., Cañizares P., Rodrigo M.A., Sáez C., Understanding the influence of the bioaerosol source on the distribution of airborne bacteria in hospital indoor air, *Environmental Research* 216 (2023a) 114458.
- [57] Pertegal V., Riquelme E., Lozano-Serra J., Cañizares P., Rodrigo M. A., Sáez C., Lacasa E., Cleaning technologies integrated in duct flows for the inactivation of pathogenic microorganisms in indoor environments: A critical review of recent innovations and future challenges, *Journal of Environmental Management*, 345 (2023b) 118798.
- [58] PKN-CEN/TR 16798-4:2023-04 – wersja angielska, Charakterystyka energetyczna budynków – – Wentylacja budynków – – Część 4: Interpretacja wymagań EN 16798-3 – – Dla budynków niemieszkalnych – – Wymagania eksploatacyjne dla systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń (Moduł M5-1, M5-4)
- [59] PN-89/Z-04111/03, Ochrona czystości powietrza. Badania mikrobiologiczne. Oznaczanie liczby grzybów mikroskopowych w powietrzu atmosferycznym (imiśnią) przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną – wycofana bez zastąpienia 13 sierpnia 2015.
- [60] PN-EN 16798-17:2017-07 – wersja angielska, Charakterystyka energetyczna budynków – – Wentylacja budynków – – Część 17: Wytyczne dotyczące inspekcji systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych (Moduł M4-11, M5-11, M6-11, M7 – 11).
- [61] PN-EN 16798-3:2017-09 – wersja angielska, Charakterystyka energetyczna budynków – – Wentylacja budynków – – Część 3: Wentylacja budynków niemieszkalnych – – Wymagania dotyczące właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń (Moduł M5-1, M5-4)
- [62] PN-EN 1822-1:2019-05 – wersja angielska, Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA) – – Część 1: Klasyfikacja, badania właściwości użytkowych, znakowanie
- [63] PN-EN 779:2005 – wersja polska, Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej – – Określanie parametrów filtracyjnych.
- [64] PN-EN ISO 16890-1:2017-01/Ap1:2019-04, Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej – Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji skuteczności określony na podstawie wielkości cząstek pyłu (ePM)
- [65] Prussin A.J., Schwake D.O., Marr L.C., Ten Questions Concerning the Aerosolization and Transmission of Legionella in the Built Environment, *Building and Environment*, 123 (2017) 684–695.
- [66] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 14 marca 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wzorów protokołów z kontroli systemu ogrzewania lub systemu klimatyzacji, Dz.U. 2023 poz. 739.
- [67] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 czerwca 2005 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać pod względem fachowym i sanitarnym pomieszczenia i urządzenia zakładu opieki zdrowotnej, Dz.U. 2005 nr 116 poz. 985.
- [68] Saran S., Gurjar M., Baronia A. in., Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in intensive care unit. *Critical Care* 24, 194 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13054-020-02907-5>
- [69] Serceau R., Lafond Grellety J., Rindel D., Perbost J.C., Guisnet P., Aerobiological Measurement in Air Conditioning Systems, Quality of the Indoor Environment, Edited by JN Lester, R Perry, G L Reynolds, Selper Ltd, London, ISBN 0948411 07 4, 1992, s. 239–257.
- [70] Solem Aune K., Hagström K., Jansson L., Ljungqvist B., Malcho F., Mottlau J., Reinmüller B., Vasara J., R³ Nordic Guideline for Hospital Ventilation General Requirements, Operating Suites, and Isolation Rooms, R³ Nordic, Nordic Society of Cleanroom Technology, 20.09.2023, https://r3nordic.org/wp-content/uploads/R3-Nordic-Guideline-for-Hospital-Ventilation_20092023.pdf (dostęp: 2.08.2024 r.).
- [71] Sturm R., Modeling the deposition of bioaerosols with variable size and shape in the human respiratory tract – A review. *Journal of Advanced Research*, (2012). 3(4), 295–304.
- [72] Takuma T., Okada K., Yamagata A., Shimono N., Niki Y., Mold colonization of fiberglass insulation of the air distribution system: effects on patients with hematological malignancies. *Medical Mycology*, 2011;49(2):150–156. doi: 10.3109/13693786.2010.510149.
- [73] Torre I., Diana M.V., Iervolino C., Borriello T., Imperato O.C., Maccarino S., Pennino F., Legionella contamination in hospitals of the Campania region: Five years of environmental surveillance results. *Annali di Igiene: Medicina Preventiva e di Comunità*, 2014, 26, 89–96.
- [74] Totaro M., Costa A.L., Casini B., Profeti S., Gallo A., Frendo L., Porretta A., Valentini P., Privitera G., Baggiani A., Microbiological Air Quality in Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems of Surgical and Intensive Care Areas: The Application of a Disinfection Procedure for Dehumidification Devices. *Pathogens*. 2019; 8(1):8. <https://doi.org/10.3390/pathogens8010008>.
- [75] WHO, Legionella and the prevention of legionellosis, Edited by: Bartram J., Chartier Y., Lee J.V., Pond K., Surman-Lee S., 2007.
- [76] Winn W.C., Jr. Legionella. W: Baron S., editor. *Medical Microbiology*. 4th edition. Galveston (TX): University of Texas Medical Branch at Galveston; 1996. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK7627/>
- [77] Zhang B.Y., Liu F., Chen X.D., The effect of *Legionella Pneumophila* contamination in the surface dust of the air ducts of central air conditioning systems on indoor air quality. *International Journal of Ventilation* (2015) 14:231–40. DOI: 10.1080/14733315.2015.11684083.

Badania sfinansowane ze środków Politechniki Warszawskiej w ramach grantu RND Inżynieria Lądowa i Transport „Analiza celowości stosowania i ocena skuteczności dezynfekcji powietrza w systemach wentylacji i klimatyzacji w wymiennikami do odzyskiwania ciepła”, kierownik grantu: dr inż. Anna Charkowska