Katarzyna Majchrzycka, Małgorzata Okrasa, Justyna Szulc

Inhalacyjne zagrożenia biologiczne a skuteczna ochrona układu oddechowego

CIOP PIB

Katarzyna Majchrzycka, Małgorzata Okrasa, Justyna Szulc

Inhalacyjne zagrożenia biologiczne a skuteczna ochrona układu oddechowego

CIOP PIB
Warszawa 2019

Opracowano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, a wydano w ramach realizacji zadań służb państwowych sfinansowanych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy
dr hab inż. Katarzyna Majchrzycka, dr Małgorzta Okrasa – Zakład Ochron Osobistych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
dr inż. Justyna Szulc, Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności, Politechnika Łódzka

Projekt okładki
Jolanta Maj

Opracowanie redakcyjne
Michalina Kondej-Matarewicz

Opracowanie graficzne
Dorota Marzec

Autor zdjęcia na okładce
Bigstock/Sergey Nivens

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2019

ISBN 978-83-7373-320-6

CIOP PIB

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. 22 623 36 98, www.ciop.pl

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie 5
Piśmiennictwo 8
1. Rodzaje szkodliwych czynników biologicznych 11
1.1. Czynniki biologiczne stanowiące narażenie w środowiskach pracy 14
1.1.1. Wirusy 14
1.1.2. Bakterie 18
1.1.3. Grzyby mikroskopowe 21
Piśmiennictwo 28
2. Narażenie na czynniki biologiczne w różnych środowiskach pracy 33
2.1. Służba zdrowia 34
2.2. Przemysł i usługi 37
2.3. Rolnictwo 43
Piśmiennictwo 47
3. Uregulowania prawne w Polsce i Unii Europejskiej 53
3.1. Ochrona pracowników przed czynnikami biologicznymi 56
3.2. Zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom stosującym środki ochrony indywidualnej 62
3.3. Ocena zgodności środków ochrony indywidualnej 65
Piśmiennictwo 69
4. Dobór sprzętu ochrony układu oddechowego do zagrożeń biologicznych 71
4.1. Identyfikacja zagrożeń i ocena ryzyka zawodowego 73
4.2. Dobór sprzętu 76
4.3. Zasady bezpiecznego stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego 84
Piśmiennictwo 88
5.Charakterystyka zjawisk zachodzących w sprzęcie filtrującym 91
5.1. Czynniki sprzyjające rozwojowi mikroorganizmów 91

5.2. Zastosowanie modelowania prognostycznego w ocenie narażenia inhalacyjnego i biobezpieczeństwa stosowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego 99
5.2.1. Modelowanie prognostyczne 99
5.2.2. Rodzaje modeli prognostycznych 101
5.2.3. Modelowanie zagrożeń inhalacyjnych w środowiskach pracy 106
5.2.4. Modelowanie przeżywalności mikroorganizmów we włókninach filtracyjnych 111
Piśmiennictwo 116
6. Wskazówki praktyczne dla użytkowników i producentów sprzętu ochrony układu oddechowego 123
6.1. Zalecenia odnośnie do oceny sprzętu i informacji producenta 126
6.2. Czas bezpiecznego stosowania sprzętu i zasady przechowywania i konserwacji 132

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwowany jest wzrost zainteresowania stosowaniem sprzętu ochrony układu oddechowego przed szkodliwym bioaerozolem. Wynika to z coraz powszechniejszej świadomości, że kontakt z mikroorganizmami może powodować różne skutki zdrowotne, od podrażenia skóry i alergii po infekcje (np. gruźlica, SARS, grypa A1H1).

Szkodliwe czynniki biologiczne stanowią bardzo ważny problem bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. Szacuje się, że w skali całego świata co najmniej kilkaset milionów ludzi narażonych jest w procesie pracy na ich działanie. Problem ten dotyczy również Polski, gdyż czynniki te są przyczyną większości chorób zawodowych identyfikowanych w populacjach pracowników rolnictwa i służby zdrowia [1].

W krajach Unii Europejskiej (UE) zagadnienia związane z ochroną pracowników przed działaniem szkodliwych czynników biologicznych reguluje dyrektywa 2000/54/WE z dnia 18 września 2000 r. [2]. Określa ona obowiązki pracodawcy dotyczące oceny i dokumentowania ryzyka zawodowego związanego z wykonywaną pracą, informowania pracowników o tym ryzyku oraz stosowania niezbędnych środków profilaktycznych i ochronnych w celu jego minimalizacji. Dyrektywa została wdrożona do prawa polskiego na mocy rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki [3].

Zgodnie z wymaganiami wymienionych aktów prawnych w odniesieniu do procesów, w trakcie których stosowane są szkodliwe czynniki biologiczne, pracodawca ma obowiązek podejmować działania profilaktyczne. Obejmują one zastosowanie środków hermetyczności, w tym środków ochrony indywidualnej (ŚOI), które są noszone lub trzymane przez pracownika. W przypadku narażenia na mikroorganizmy przenoszone drogą powietrzną (bioaerozole) konieczne jest stosowanie sprzętu ochrony układu oddechowego, wykorzystującego zjawisko

filtracji cząstek. Sprzęt ten, aby mógł być dostarczany pracownikom zgodnie z zasadami określonymi w kodeksie pracy, musi spełniać wymagania oceny zgodności z zasadniczymi wymaganiami, określonymi w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2016/425 [4]. Potwierdzeniem tej oceny jest obecność na wyrobie oznakowania CE. Rozporządzenie zawiera jedynie ogólne zapisy dotyczące wymagań dla ŚOI w odniesieniu do przewidywanego poziomu ochrony, który wynika z zaliczenia ŚOI do odpowiedniej katergorii ryzyka.

ŚOI przeznaczone do ochrony przed czynnikami biologicznymi zaliczane są do najwyższej, III kategorii ryzyka, co oznacza, że są one stosowane do ochrony przed bezpośrednimi zagrożeniami życia i zdrowia pracowników. Zasadnicze wymagania w rozporządzeniu sformułowano na poziomie ogólnym, a zatem tam, gdzie jest to możliwe, producent sprzętu powinien do oceny zgodności zastosować normy zharmonizowane. Zawierają one wyspecyfikowane metody badań sprzętu i kryteria jego oceny. W przypadku sprzętu ochrony układu oddechowego normy zharmonizowane odnoszą się jedynie do ochrony przed czynnikami chemicznymi. Taka sytuacja powoduje, że standardowy sprzęt ochrony układu oddechowego nie zawsze zapewnia bezpieczeństwo pracownikom narażonym na wdychanie szkodliwego bioaerozolu. Wynika to z faktu niedostatecznej informacji producenta co do czasu bezpiecznego stosowania sprzętu i zasad jego dopasowywania i powtórnego użycia na stanowiskach pracy.

Konsekwencją opisanej sytuacji jest stosowanie przez pracowników standardowego sprzętu do ochrony przed czynnikami biologicznymi. Niedostateczna wiedza pracodawców o zjawiskach zachodzących w sprzęcie i brak adekwatnych zapisów w normach zharmonizowanych jest przyczyną mało skutecznego wdrażania sprzętu o cechach biobójczych, opracowanego przez jednostki badawcze wspólnie z krajowymi producentami sprzętu ochrony układu oddechowego [5-9]. Nadal na stanowiskach pracy stosowany jest sprzęt, którego skuteczność

ochronna potwierdzana jest jedynie z wykorzystaniem niebiologicznych aerozoli modelowych – chlorku sodu i mgły oleju parafinowego [10,11].

Jednocześnie należy podkreślić, że normy zharmonizowane pomijają nie tylko aspekt związany ze skutecznością tego sprzętu wobec bioaerozolu, ale także z oceną jego bezpiecznego stosowania. Tymczasem w licznych pracach wykazano [12-25], że w materiałach filtracyjnych powszechne jest zjawisko ich kolonizacji przez mikroorganizmy, co może prowadzić do sytuacji, w której sprzęt filtrujący stanowi wtórne źródło zagrożenia dla pracowników. Dzieje się tak wówczas, gdy zatrzymane we włókninie filtracyjnej mikroorganizmy ponownie przedostaną się do strumienia powietrza oddechowego. Dlatego sprzęt ochrony układu oddechowego przeznaczony do ochrony przez szkodliwym bioaerozolem powinien wykazywać działanie biobójcze w stosunku do szkodliwych mikroorganizmów obecnych w środowisku pracy. Ta cecha powinna być zapewniona szczególnie w sytuacji, gdy sprzęt jest oceniany i dopuszczony do stosowania na terenie UE jako sprzęt wielokrotnego użycia. Oznacza to, że nie musi być on utylizowany po 8-godzinnym stosowaniu przez pracownika, ale może być użyty podczas pracy przez kolejne dni. Wymiana na nowy egzemplarz następuje wtedy, gdy wzrost oporu przepływu powietrza na skutek depozycji pyłu we włókninie znacznie utrudnia oddychanie. Praktycznie oznacza to, że pracownik sam decyduje o długości czasu stosowania sprzętu, bez wiedzy na temat zjawisk, które w nim zachodzą. Takie postępowanie może być przyczyną dolegliwości zdrowotnych pracownika, które jednak trudno będzie zidentyfikować jako skutek stosowania niewłaściwego sprzętu ochrony układu oddechowego.

Jednocześnie, z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa pracownikom zatrudnionym w narażeniu na szkodliwe czynniki biologiczne, ważne jest dostarczenie pracodawcom odpowiedniej wiedzy i właściwych rozwiązań w zakresie sprzętu ochrony układu oddechowego. W myśl postanowień dyrektywy UE nr 89/656/EWG [26] to pracodawca jest odpowiedzialny za ustalenie

bezpiecznych warunków stosowania ŚOI, a w szczególności czasu ich stosowania przez pracowników. Czas ten rozumiany jest nie tylko w odniesieniu do oceny dopuszczalnego czasu narażenia, ale także ustalenia momentu, w którym sprzęt traci swoje walory ochronne i powinien być przez pracownika wymieniony na nowy.

Ważne jest podkreślenie jeszcze jednego problemu związanego z doborem właściwego sprzętu ochronnego. Pracodawca powinien podczas tego doboru uwzględnić stan zdrowia pracownika. W odniesieniu do stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego konieczne jest zatem rozważenie wszelkich dolegliwości związanych z układem oddechowym (jama nosowo-gardłowa, krtań, tchawica, oskrzela, pęcherzyki płucne), a także wszelkich alergii oddechowych i skórnych. Czynniki biologiczne, nawet gdy należą do 1. grupy zagrożenia, mogą przyczyniać się do wystąpienia lub nasilenia dolegliwości alergicznych. Dlatego też stosowanie standardowego (niebiobójczego) sprzętu ochrony układu oddechowego do ochrony pracowników narażonych na wdychanie szkodliwego bioaerozolu może być postrzegane jako nieprawidłowy dobór sprzętu do warunków panujących na stanowiskach pracy. Oznacza to dla pracodawcy niespełnienie wymagań dyrektywy 89/656/EWG [26], a dla pracownika brak właściwego sposobu ochrony przed zagrożeniami.

Piśmiennictwo

1. Dudkiewicz J., Jabłoński L., Olenchock S.A., Occupational biohazards: A review. Am. J. Ind. Med. 1988, 14: 605-623.
2. Dyrektywa 2000/54/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady Europejskiej z dnia 18 września 2000 r. w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy (siedemnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG). Dz.U. WE L 262 z 17.10.2000, str. 21.
3. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki. Dz.U. z 2005 r. nr 81, poz. 716.

4. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2016/425/UE z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG, Dz. U. UE L 81/51.

5. Majchrzycka K., Gutarowska B., Brochocka A., Brycki B. New filtering antimicrobial nonwovens with various carriers for biocides as respiratory protective materials against bioaerosol. JOSE 2012, Vol. 18, No 3: 375-385.

6. Gutarowska B., Skóra J., Nowak E., Łysiak I., Wdówka M. Antimicrobial Activity of Filtratino Effectiveness of Nonwovens with Sanitized for Respiratory Protective Equipment. Fibres & Textiles In Eastern Europe 2014, 22, No 3(105): 120-125.

7. Gutarowska B., Michalski A. Antimicrobial Activity of Filtrating Melt-blown Nonwoven with the Additions of Silver Ions. Fibres & Textiles In Eastern Europe 2009, Vol. 17, No 3(74): 23-28.

8. Brochocka A., Majchrzycka K. Technology for the Production of Bioactive Melt-blown Filtration Materials Applied to Respiratory Protective Devices. Fibres & Textiles In Eastern Europe 2009; Vol. 17, No 5(76): 92-98.

9. Majchrzycka K. Evaluation of a new bioactive nonwoven for respiratory protection. Fibres & Textile in Eastern Europe 2014, 1(103): 81-88.

10. EN 143:2000/A1/2006 Respiratory protective devices – Particle filters - Requirements, testing, marking; Odpowiednik krajowy: PN-EN 143:2004/A1:2007 Sprzęt ochrony układu oddechowego. Filtry. Wymagania, badanie, znakowanie.

11. EN 149:2001+A1: 2009 Respiratory protective devices – Filtering half mask - Requirements, testing, marking; Odpowiednik krajowy: PN-EN 149:2001+A1:2009 Sprzęt ochrony układu oddechowego. Półmaski filtrujące. Wymagania, badanie, znakowanie.

12. Bonnevie Perrier J.C., Le Coq L., Andres Y., Le Cloire P. SFGP 2007 - microbial growth onto filter media used in air treatment devices. International Journal of Chemical Reactor Engineering 2008, 6.

13. Jankowska E., Reponen T., Willeke K., Grinshpun S.A., Choi K.J. Collection of fungal spores on air filters and spore reentrainment from filters into air. Journal of Aerosol Science 2000, 31(8): 969-978.

14. Kemp P.C., Neumeister-Kemp H.G., Lysek G., Murray F. Survival and growth of micro-organisms on air filtration media during initial loading. Atmospheric Environment 2001, 35: 4739-4749.

15. Brosseau L.M., McCullough N.V., Vesley D. Bacterial survival on respirator filters and surgical masks. J. Am. Biol. Saf. Assoc. 1997,2: 232–243.

16. Maus R., Goppelsroder A., Umhauer H. Survival of bacterial and mold spores in air filter media. Atmospheric Environment 2001,35: 105-113.

17. Maus R., Goppelsröder A., Umhauer H. Viability of bacteria in unused air filter media. Atmosheric Environment 1997, Vol. 31, Issue 15: 2305-2310.

18. Forthomme A., Joubert A., Andres Y., Simon X., Duquenne P., Bemer D., Le Coq L. Microbial aerosol filtration: Growth and release of a bacteria-fungi consortium collected by fibrous filters in different operating conditions. Journal of Aerosol Science 2014, 72: 32-46.

19. Hasegawa N., Yamasaki S., Horiguchi Y. A study of bacterial culturability during bioaerosol challenge test using a test chamber. Journal of Aerosol Science, 2011,42: 397-407.

20. Pasanen A., Keinanen J., Kalliokoski P., Martikainen P., Ruuskanen J. Microbial growth on respirator filters from improper storage. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health 1993,19(6): 421-425.

21. Reponen T.A., Wang Z., Willeke K., Grinshpun S.A. Survival of mycobacteria on N95 personal respirators. Infect Control Hosp Epidemiol 1999, 20: 237-241.

22. Wang K., Reponen T.A., Willeke K. Survival of bacteria on respirator filters. Aerosol Sci Tech, 30,1999: 167-173.

23. Rengsamy A., Zhuang Z., BerryAnn R. Respiratory protection against bioaerosols: literature review and research needs. American Journal of Infection Control 2004,32: 345-54.

24. Van der Sande M., Teunis P., Sabel R. Professional and home-made face masks reduce exposure to respiratory infections among the general population. Plos One, 2008.

25. Lai A.C.K., Poon C.K.M., Cheung A.C.T. Effectiveness of facemasks to reduce exposure hazards for airborne infections among general populations. Journal of the Royal Society 2012, 9(70): 938-948.

26. Dyrektywa Rady nr 89/656/EWG z dnia 30 listopada 1989 r. w sprawie w sprawie minimalnych wymagań w dziedzinie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników korzystających z wyposażenia ochronnego. Dz. Urz. WE L 393, 30/12/1989P, s. 0019-0029.

1. Rodzaje szkodliwych czynników biologicznych

Według obecnie obowiązującej definicji szkodliwe czynniki biologiczne obejmują: drobnoustroje komórkowe (w tym zmodyfikowane genetycznie); jednostki bezkomórkowe zdolne do replikacji lub przenoszenia materiału genetycznego (w tym zmodyfikowane genetycznie); hodowle komórkowe oraz pasożyty wewnętrzne człowieka, które mogą być przyczyną zakażenia, alergii lub zatrucia [1].

Źródłem szkodliwych czynników biologicznych w środowisku pracy mogą być przetwarzane surowce (szczególnie podatne na rozwój mikroorganizmów materiały roślinne i zwierzęce), przechowywane produkty, materiały kliniczne, zakażeni ludzie i nosiciele, wydaliny ludzi i zwierząt oraz gleba. Z tych źródeł czynniki biologiczne przedostają się do powietrza, tworząc bioaerozol określany jako zbiór cząstek biologicznych rozproszonych w powietrzu lub innej fazie gazowej [2]. Bioaerozol w miejscu pracy powstaje najczęściej w następstwie:

- procesów mielenia, suszenia, rozdrabniania, mieszania, dozowania, transportowania,
- malowania natryskowego, metalizacji, ochrony roślin, talkowania, grafitowania,
- skrawania materiałów kruchych, szlifowania, polerowania, czyszczenia powierzchni pod powłoki ochronne, spawania i cięcia, spalania, obróbki materiałów pylących,
- pylenia wtórnego, tzn. unoszenia się pyłów zalegających na powierzchni maszyn, urządzeń i konstrukcji [3].

Jeżeli materiał techniczny wykorzystywany w trakcie wymienionych procesów produkcyjnych jest źródłem czastek biologicznych będą one z łatwością przedostawały się do otaczającej atmosfery tworząc bioaerozol.

Wdychanie bioaerozolu przenoszonego drogą powietrzno-kropelkową stwarza największe zagrożenie dla zdrowia pracowników. Mniejsze

zagrożenie zawodowe związane jest z wprowadzeniem tych czynników przez skórę, błony śluzowe lub drogą pokarmową [4].

Narażenie na bioaerozol występujący w środowisku pracy skutkować może licznymi dolegliwościami zdrowotnymi i chorobami, takimi jak: podrażnienie błon śluzowych, alergiczny nieżyt nosa, alergiczne zapalenie spojówek i skóry, alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych (AZPP), astma oskrzelowa, syndrom toksyczny wywołany pyłem organicznym (Organic Dust Toxic Syndrome; ODTS) i inne [5,6]. Szkodliwość bioaerozolu przedostającego się do organizmu drogą oddechową zależy od miejsca jego osadzenia się i czasu przebywania w układzie oddechowym człowieka, co jest ściśle związane z parametrem określanym jako średnica aerodynamiczna cząstek bioaerozolu [7]. Najgroźniejsze konsekwencje zdrowotne przypisuje się najmniejszym cząstkom, o rozmiarach poniżej 0,5 µm (np. pojedyncze zarodniki grzybów, komórki bakterii), zdolnym do penetracji całego drzewa oskrzelowego i docierania do pęcherzyków płucnych (tabela 1.1.). Mogą one wywoływać AZPP. Większe cząstki osadzają się w obrębie nosa, gardła i tchawicy, powodując podrażnienia i błon śluzowych i/lub objawy astmatyczne.

Tabela 1.1. Szkodliwość zdrowotna bioaerozlu w zależności od wielkości cząstek

Wielkość cząstek bioaerozlu [µm]	Miejsce depozycji i szkodliwość zdrowotna	Przykłady cząstek bioaerozolu
≥10	zatrzymywane są w obrębie nosa i gardła; powodują podrażnienia błony śluzowej	pyłki roślin, zarodniki grzybów
5-10	docierają do rejonów gardła i tchawicy; mogą wywoływać objawy astmatyczne	zarodniki grzybów, agregaty cząstek bioaerozoli
≤0,5	penetrują od oskrzeli do pęcherzyków płucnych; mogą wywoływać AZPP	pojedyncze zarodniki grzybów, komórki bakterii, ich fragmenty

Od przełomu XX i XXI wieku zagrożenia związane z występowaniem szkodliwych czynników biologicznych w środowisku pracy stały się istotnym zagadnieniem medycyny pracy i zdrowia publicznego. Stało się tak ze względu na stale rosnącą liczbę zawodowych chorób zakaźnych oraz wysoką śmiertelność w ich następstwie w Unii Europejskiej oraz na świecie. W Polsce czynniki biologiczne są przyczyną licznych chorób zawodowych, zwłaszcza wśród rolników i pracowników służby zdrowia.

Według obowiązującego w Polsce wykazu chorób zawodowych aż 8 z 26 grup chorobowych powodowanych jest czynnikami biologicznymi o działaniu alergicznym lub zakaźnym [8]. Wśród pojedynczych jednostek chorobowych wymienić można:

- astmę oskrzelową,
- zewnątrzpochodne AZPP,
- ostre uogólnione reakcje alergiczne,
- alergiczny nieżyt nosa,
- zapalenie obrzękowe krtani o podłożu alergicznym,
- alergiczne zapalenie spojówek,
- drożdżakowe zapalenie skóry rąk,
- grzybice skóry,
- epidemiczne wirusowe zapalenie spojówek lub rogówki,
- choroby zakaźne lub pasożytnicze albo ich następstwa [8].

Wraz z postępem badań naukowych występowanie szkodliwych czynników biologicznych i ich źródeł udowadnia się dla coraz większej liczby środowisk pracy i grup zawodowych Największy problem stanowią one w przypadku krajów słabo rozwiniętych gospodarczo, gdzie standardy higieniczno-sanitarne w miejscu pracy nie są należycie przestrzegane.

1.1. Czynniki biologiczne stanowiące narażenie w środowiskach pracy

Pracownik w miejscu pracy najczęściej narażony jest na szkodliwe działanie wirusów, bakterii oraz grzybów mikroskopowych (drożdży i pleśni) [9]. Poniżej scharakteryzowano najważniejsze grupy szkodliwych czynników biologicznych stwarzających zagrożenie dla zdrowia pracowników.

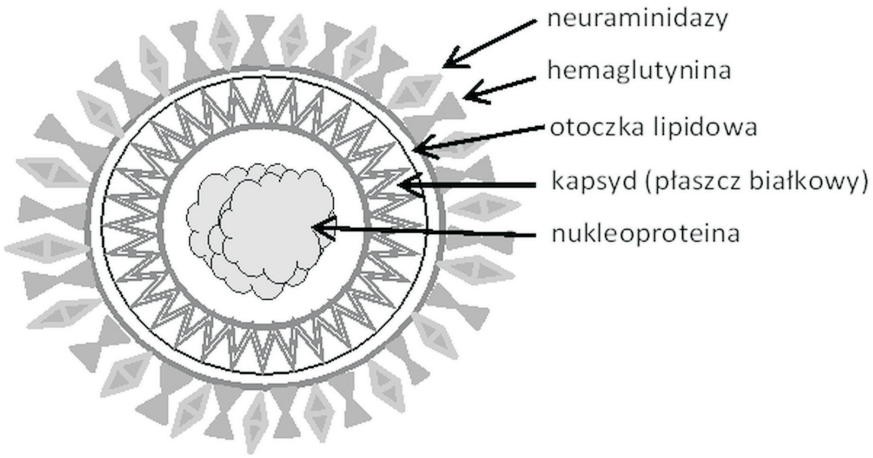
1.1.1. Wirusy

Wirusy to skomplikowane cząsteczki organiczne, zbudowane z białek i kwasów nukleinowych, nieposiadające struktury komórkowej o wielkości od 20 nm do 400 nm. Przejawiają one ogromną różnorodność biologiczną zarówno w zakresie cech morfologicznych (wielkość, rodzaj symetrii, obecność lub brak ogonka), jak i genetycznych (rodzaj kwasu nukleinowego, wielkość genomu) [10]. Do najbardziej znanych chorób wirusowych należą: ospa, choroba Heinego-Medina (paraliż dziecięcy), odra, różyczka, żółta febra, kleszczowe zapalenie mózgu, gorączki krwotoczne, zapalenie wątroby, świnka i grypa [10]. Szacuje się, że obecnie poznano 5000 gatunków wirusów spośród 130 000 prawdopodobnie występujących na świecie [11].

Według danych WHO (World Helath Organization, Światowa Organizacja Zdrowia) wirusy oddechowe stanowią przyczynę 60-90% przypadków ostrego zapalenia górnych dróg oddechowych [12]. Należy do nich około 200 typów wirusów, przede wszystkim rinowirusy (hRV) (odpowiedzialne za 30-50% przypadków zakażeń), koronawirusy (hCoV, 10-15%), wirusy grypy (FluAV i FluBV, 5-15%), syncytialny wirus oddechowy (hRSV, 5-10%), oraz adenowirusy (hAdV), enterowirusy i wirusy paragrypy (hPIV), odpowiedzialne za około 5% infekcji, jak również metapneumowirusy (hMPV, 6%) czy bokawirusy (hBOV) [12]. Najbardziej narażeni na nie są pracownicy służby zdrowia, transportu publicznego,

służb porządkowych, pracownicy biurowi oraz nauczyciele. Z racji swoich obowiązków służbowych są oni poddawani powtarzającej się, intensywnej ekspozycji związanej z kontaktem z licznymi chorymi oraz pracą w pomieszczeniach zamkniętych [13-15].

W ciągu ostatnich kilkunastu lat ważnymi czynnikami stwarzającymi zagrożenie zawodowe stały się także wirusy grypy (rys. 1.1.). Wśród nich wyróżnia się typ B i C, charakterystyczne dla człowieka, oraz typ A występujący także u zwierząt – głównie ptaków i trzody chlewnej. Najważniejszą cechą wirusów grypy jest ich zmienność i łatwość transmisji podczas kaszlu, kichania, silnego wydechu, śmiechu czy rozmowy, dzięki czemu są zdolne do wywoływania epidemii i pandemii. Kliniczny przebieg grypy uwarunkowany jest wiekiem pacjenta, stanem immunologicznym organizmu, paleniem tytoniu, współistniejącymi chorobami oraz właściwościami wirusa [16,17].



Rys. 1.1. Uproszczona budowa wirusa grypy (źródło: własne PŁ)

Według danych WHO, co roku na świecie na grypę choruje od 330 mln do 1,575 mld ludzi, z których umiera od 0,5 do 1 mln [12]. W ramach monitoringu sytuacji epidemiologicznej grypy w Polsce, w sezonie grypowym 2018/2019 (1 września 2018 r. – 15 marca 2019 r.) zanotowano

blisko 3,4 mln zgłoszeń przypadków zachorowań lub podejrzeń zachorowań na grypę i zachorowania grypopodobne [18].

Na uwagę zasługuje wirus A/(H5N1), odpowiedzialny za ptasią grypę u drobiu domowego oraz ptactwa dzikiego. U człowieka powoduje on niezwykle ciężką postać grypy, obarczoną ok. 60% śmiertelnością, jednak niełatwo pokonuje barierę gatunkową (ptak-człowiek) i praktycznie nie potrafi rozprzestrzeniać się pomiędzy ludźmi. W Polsce, jak do tej pory, nie wystąpił ani jeden przypadek zachorowania na grypę ptaków. Zakażenie tym wirusem spowodowało natomiast liczne przypadki śmiertelne w Azji i Afryce. Łagodniejsze zakażenia (objawy grypopodobne, zapalenie spojówek) wywołuje wirus ptasiej grypy podtypu (H7N7), odpowiedzialny za epidemie wśród hodowców drobiu w Holandii i Kanadzie w latach 2003-2004 [19].

Ryzyko zawodowe stanowić mogą także wirusy świńskiej grypy: A/(H1N1); A/(H1N2); A/(H3N1) i A/(H3N2), na które narażeni są głównie hodowcy trzody chlewnej, weterynarze oraz pracownicy rzeźni i przemysłu mięsnego [17].

W związku z przekroczeniem przez wirusy grypy A/H1N1 granic państw i kontynentów oraz utrzymującą się transmisją wirusa z człowieka na człowieka, w czerwcu 2009 r. WHO ogłosiła pierwszą w naszym stuleciu pandemię grypy. Pandemia trwała do sierpnia 2010 r. Szacuje się, że w Polsce w tym okresie wirus A/H1N1 mógł być przyczyną nawet 90% wszystkich podejrzeń/zachorowań na grypę.

Częstym czynnikiem biologicznym odpowiedzialnym za infekcje górnych i dolnych dróg oddechowych są także wirusy paragrypy (wirus grypy rzekomej, Human Parainfluenza Virus, HPV). W okresie wiosenno-letnim dominują wirusy HPIV3 i HPIV4, natomiast w sezonie jesienno-zimowym HPIV1 i HPIV2. Infekcje wywołane tymi wirusami zwykle są łagodne (zapalenie krtani lub oskrzeli) i bywają mylone z przeziębieniem. Jednakże u osób z obniżoną odpornością mogą skutkować zapaleniem płuc z przebiegiem zagrażającym życiu [20].

Wśród wirusów rozprzestrzeniających się w postaci bioaerozolu wyróżnić należy także koronowirus (SCoV), wywołujący zespół ostrej niewydolności oddechowej określany jako SARS. Podczas pandemii wirusa SARS 2003 r. w Azji zarażonych zostało ponad 50% pracowników służby zdrowia i stanowili oni od 20 do 40% wszystkich pacjentów [12].

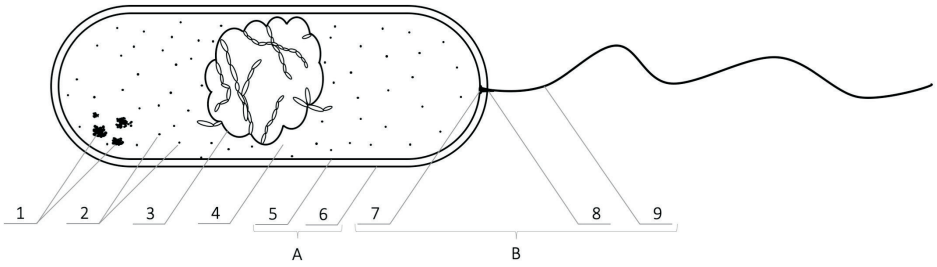
Do innych wirusów stwarzających zagrożenie zawodowe zaliczyć należy hantawirusy i arenawirusy, pochodzące od gryzoni (m.in. nornicy rudej, czy myszy wielkookiej polnej). Ze względu na źródło tych wirusów najbardziej narażeni na nie są rolnicy, pracownicy laboratoriów i wiwariów. Zachorowania powodowane hantawirusami i arenawirusami notowano na całym świecie. Następują one najczęściej na skutek wdychania pyłu zanieczyszczonego odchodami gryzoni, rzadziej przez uszkodzoną skórę. Konsekwencje zdrowotne zakażenia tymi wirusami obejmują gorączkę krwotoczną, gorączkę krwotoczną z zespółem nerkowym (Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome, HFRS) i zespół wątrobowo-płucny (Hepatopulmonary Syndrome, HPS) [21].

Interesujący jest fakt, że przebytym zakażeniom wirusowym przypisuje się udział w powstawaniu syndromu chronicznego zmęczenia (CFS – Chronic Fatigue Syndrome), które wśród pracowników biurowych bywa nazywane „grypą yuppie". Syndrom ten objawia się m.in. zmęczeniem nieustępującym po odpoczynku, bólami głowy, gardła, stawów, powiększeniem węzłów chłonnych, problemami z pamięcią i koncentracją [20]

Należy zwrócić uwagę, że zagrożenie zawodowe mogą także powodować wirusy prowadzące do zakażenia w wyniku bezpośredniego kontaktu z krwią, wydzielinami i wydalinami chorych zwierząt i ludźmi. Należą do nich wirus m.in. wirus Nipah, Hendra, wścieklizny czy gorączki krwotocznej Ebola, stwarzające ryzyko zawodowe dla rolników, pracowników rzeźni i służb weterynaryjnych [22].

1.1.2. Bakterie

Bakterie to prokariotyczne organizmy jednokomórkowe. Oznacza to, że nie posiadają jądra, organelli i układu błon charakterystycznych dla organizmów wyżej rozwiniętych pod względem organizacji komórki (organizmy eukariotyczne). W ich budowie wyróżnić można osłony komórkowe (ścianę i błonę komórkową), nukleoid, rybosomy, cytoplazmę, substancje (ziarnistości) zapasowe i rzęski (złożone z ciałka podstawowego, haka i włókna) w przypadku bakterii ruchliwych (rys. 1.2.) [10].



Rys. 1.2.Schemat budowy komórki bakterii, 1 – ziarnistości zapasowe, 2 – rybosomy, 3 – nukleoid, 4 – cytoplazma, 5 – błona cytoplazmatyczna, 6 – ściana komórkowa, 7 – ciałko podstawowe, 8 – hak, 9 – wółkno, A – osłony komórkowe, B – rzęska (źródło: własne CIOP-PIB)

Bakterie są organizmami mało zróżnicowanymi pod względem morfologicznym. Komórki bakterii zwykle mieszczą się w wymiarach od 1 do kilku mikrometrów i mogą wykazywać kształt kulisty (ziarniaki), cylindryczny (pałeczki i laseczki) lub spiralny (krętki i śrubowce). Mogą występować pojedynczo lub w charakterystycznych ugrupowaniach (dwoinki, paciorki, pakiety i grona), będących wynikiem podziału komórek w różnych płaszczyznach. Bakterie cechuje fizjologiczna różnorodność oraz zdolność do szybkiego wzrostu i metabolizmu. Na Ziemi istnieje ok. $5x10^{30}$ komórek bakteryjnych, które należą do ok. 800 gatunków, ale ich rzeczywista liczba nie została dotychczas dokładnie określona [10].

Poważny problem stanowi zawodowe narażenie na bakterie *Legionella pneumophila*, które dotyczy pracowników przemysłu wydobyw-

czego, metalurgicznego, służby zdrowia, gospodarki odpadami i ogrodnictwa. Bakterie te są przyczyną legionelozy przebiegającej zazwyczaj pod postacią ciężkiego zapalenia płuc lub grypopodobnej gorączki Pontiac. Zakażenie tym czynnikiem biologicznym następuje w wyniku wdychania wodnego/olejowego bioaerozolu lub pyłu glebowego [23,24].

Z kolei w rolniczym środowisku pracy zagrożenie zawodowe związane jest z obecnością paciorkowców *Streptococcus suis*, izolowanych od trzody chlewnej, przeżuwaczy, a czasem nawet zwierząt domowych. Bakterie te mogą wywoływać u ludzi odzwierzęce zapalenie opon mózgowo-rdzeniowych, stawów, płuc, wsierdzia oraz głuchotę [25]. W tym środowisku pracy zagrożenie stwarzać mogą również bakterie z rodzaju *Campylobacter*, które wchodzą w skład mikrobiomu zasiedlającego układ pokarmowy zwierząt hodowlanych. Są one czynnikiem etiologicznym kampylobakteriozy przebiegającej pod postacią zapalenia jelit i żołądka [26].

Dodatkowo liczne bakterie występujące w rolniczym środowisku pracy mają zdolność do wywoływania zakażeń. Są to m.in. *Acinetobacter calcoaceticus*, *Alcaligenes faecalis*, *Pasteurella aerogenes*, *Pantoea agglomerans* oraz *Rahnella* [27]. Stwierdzono także, że *Alcaligenes faecalis* i *Pantoea agglomerans* (gramujemne pałeczki) oraz *Arthrobacter globiformis* i *Agromyces ramosus* (gramdodatnie pałeczki) stanowią źródło wysoce aktywnych biologicznie alergenów, przez co powodować mogą AZPP. Podejrzewa się również, że *Pantoea agglomerans* może wywoływać dermatozy o podłożu zawodowym. Z kolei bakterie *Rahnella sp*., bytujące naturalnie na drewnie i w pyle drzewnym, są częstą przyczyną alergii zawodowych u pracowników składów drzewnych, leśników, tartaków i stolarzy [28].

Specyficzną grupę bakterii potencjalnie szkodliwych dla zdrowia człowieka stanowią aktynobakterie (promieniowce). Aktynobakterie mają budowę prokariotyczną, ale morfologicznie ze względu na wytwarzanie pseudogrzybni substratowej i powietrznej przypominają grzyby strzępkowe [10]. Wykazują one zdolności do wytwarzania wielu

enzymów o charakterze biodeterioracyjnym (odpowiedzialnych za rozkład i korozję mikrobiologiczną materiałów technicznych), dlatego też promieniowce często izoluje się ze zniszczonych obiektów zabytkowych. Stąd też, osoby zatrudnione w takich miejscach, jak archiwa, biblioteki, muzea czy pracownie konserwatorskie narażone są na kontakt z tą grupą szkodliwych czynników biologicznych. Z kolei naturalnym rezerwuarem promieniowców jest gleba, dlatego dobre warunki do rozwoju znajdują one w zakładach produkujących komposty, podłoża do pieczarek i pieczarki [29].

Stwierdzono, że promieniowce stanowią czynnik etiologiczny AZPP, określanego jako „płuco rolnika" i „płuco farmera". Największy potencjał alergizujący wykazują gatunki: *Saccharopolyspora rectivirgula*, *S. viridis*, *Thermoactinomyces vulgaris* i *T. thalpophilus*, które dobre warunki do rozwoju napotykają w wilgotnych, samozagrzewających się materiałach roślinnych np. zbożu, sianie czy kiszonkach. Promieniowce są również czynnikiem etiologicznym zakażeń oportunistycznych (szczególnie płuc i mózgu) u osób z immunosupresją lub dysfunkcją układu odpornościowego. Wśród patogenów inwazyjnych największe znaczenie kliniczne mają aktynobakterie z rodzaju *Actinomyces*, *Corynebacterium*, *Gordonia*, *Mycobacterium*, *Nocardia* i *Tsukamurella*; natomiast wśród patogenów oportunistycznych: *Rothia*, *Nocardiopsis*, *Propionibacterium* [30].

Warto mieć świadomość, że szkodliwe działanie bakterii gramujemych, występujących w bioaerozolach, może wynikać z zawartości w ich zewnętrznej warstwie ściany komórkowej endotoksyn. Są to heteropolimery zbudowane z odcinka tłuszczowego (lipid A) warunkującego efekty toksyczne, oraz wielocukrowego (oligosacharydowy rdzeń oraz 0-swoisty łańcuch polisacharydowy – antygen 0), odpowiedzialnego za reakcje immunologiczne [31]. Endotoksyny, określane też jako biologicznie aktywne lipopolisacharydy (LPS), dostają się do atmosfery wskutek fragmentacji ściany komórkowej bakterii gramujemnych tworząc bioaerozol w postaci mikropęcherzyków o wielkości od 30 do

50 nm. Oprócz występowania w bioaerozolu, endotoksyny w dużych stężeniach znajdują się także w pyle roślinnym, np. ze zboża, czy drewna. Dlatego też najbardziej narażeni na inhalację tych substancji są pracownicy przemysłu paszowego, spożywczego, zielarskiego, tekstylnego, kompostowni, browarów i młynów, rolnicy, piekarze oraz stolarze. Wykazano, iż w zakładach przemysłu spożywczego stężenie endotoksyn w powietrzu wynosić może nawet 101-103 μg/m^3 [31].

Inhalacja endotoksyn powodować może nieswoistą aktywację makrofagów płucnych, wywołując odczyn zapalny, gorączkę, zaburzenia w wymianie gazów i skurcz oskrzeli oraz zaostrzenie reakcji astmatycznych. Ponadto udowodniono, że endotoksyny biorą udział w patogenezie ODTS. Co ciekawe, odkryto, iż narażenie na niewielkie stężenia endotoksyn w powietrzu może być korzystne dla zdrowia ludzi, ponieważ indukuje aktywność immunostymulacyjną, a więc zwiększa odporność organizmu na infekcje, choroby alergiczne oraz chroni przed nowotworami [32].

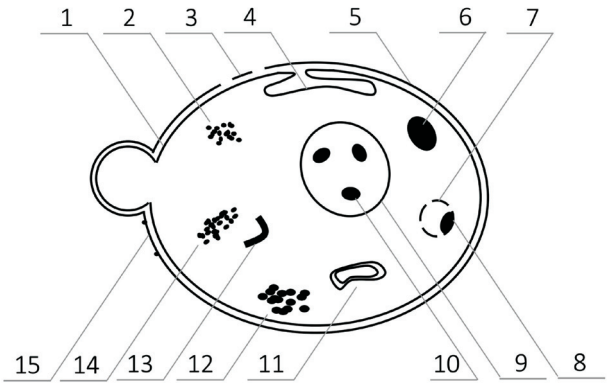
Również bakterie gramdodatnie są źródłem substancji mogących oddziaływać niekorzystnie na organizm człowieka. Mają one w składzie ściany komórkowej peptydoglikan (inaczej mureinę). Jest to substancja makrocząsteczkowa, która podobnie jak endotoksyny, może wywoływać procesy zapalne w płucach [33]. Ponadto bakterie gramdodatnie mogą być źródłem innych związków należących do peptydów, białek, kwasów lipotejchonowych (LTA) o potencjalnych właściwościach immunotoksycznych dla człowieka.

1.1.3. Grzyby mikroskopowe

Grzyby mikroskopowe zaliczamy do domeny *Eucarya*, obejmującej organizmy posiadające w swojej morfologii jądro komórkowe oraz rozwinięty układ błon komórkowych. Szacuje się, że obecnie poznano 69 tys. gatunków grzybów spośród 1,5 mln prawdopodobnie występują-

cych na świecie [11]. Zgodnie z tradycyjnym podziałem wyróżnić możemy drożdże oraz grzyby strzępkowe (pleśniowe, pleśnie) [10].

Drożdże stanowią grupę mikroorganizmów jednokomórkowych, o budowie przedstawionej na rys. 1.3.

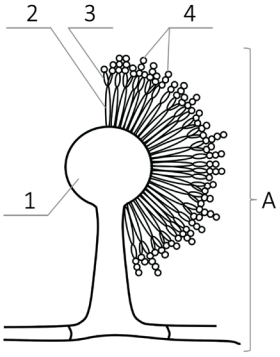


Rys. 1.3.Schemat budowy komórki drożdży: 1 – błona komórkowa, 2 – rybosomy, 3 – blizna po paczku, 4 – mezosom, 5 – ściana komórkowa, 6 – lipidy, 7 – jądro, 8 – jąderko, 9 – wakuola, 10 – wolutyna, 11 – mitochondrium, 12 – glikogen, 13 – retikulum endoplazmatyczne, 14 – diktiosomy, 15 – blizna po oderwaniu się od komórki macierzystej (źródło: własne CIOP-PIB)

Wielkość i kształt komórek drożdży są bardzo zróżnicowane i zależne nie tylko od rodzaju drożdży i ich stanu fizjologicznego, ale również od warunków środowiska i funkcji komórki w populacji. Zwykle komórka drożdży ma długość 1-8 µm, szerokość 1-6 µm i występuje w jednym z sześciu podstawowych kształtów: kulistym, elipsoidalnym, cytrynkowatym, butlekowatym, cylindrycznym lub nitkowatym. Jednak komórki drożdży tworzących pseudomycelium i mycelium (wydłużone nitkowate struktury) osiągają znacznie większe rozmiary (do kilkudziesięciu mikrometrów). Drożdże rozmnażają się wegetatywnie przez pączkowanie, podział (rozszczepienie) lub połączenie obu tych procesów. Niektóre rodzaje zdolne są do zarodnikowania w procesie rozmnażania generatywnego [10,34].

Cechą charakterystyczną pleśni jest plecha zbudowana ze skupiska rozgałęzionych strzępek określanych jako mycelum (grzybnia właściwa). U grzybów wyższych strzępki są podzielone przegrodami poprzecznymi (septami) na jedno-, dwu-, lub wielojądrowe komórki. Z kolei u grzybów niższych występuje wielojądrowa komórka niepodzielona – komórczak [10].

Pleśnie mogą rozmnażać się zarówno drogą płciową, jak i bezpłciową. U niektórych rodzajów grzybów występują obydwie formy rozmnażania. W obu przypadkach wytwarzają zarodniki w specjalnych strukturach reprodukcyjnych, takich jak sporangia (tworzą zarodniki), konidiofory (wyspecjalizowane strzępki tworzące konidia) i gametangia (tworzą gamety) [10,34]. Morfologia pleśni jest cechą gatunkową i w mikrobiologii klasycznej stanowi podstawę do określania ich przynależności taksonomicznej. Na rys. 1.4. zobrazowano schematycznie budowę pleśni z rodzaju *Aspergillus*. Należy podkreślić, iż pleśnie wykazują dużą zdolność przystosowywania się do warunków panujących w otaczającym środowisku – rodzaju substancji odżywczych, warunków klimatycznych. Pod względem odżywiania zaliczane są do oligotrofów – organizmów o małych wymaganiach pokarmowych, na skutek czego ich występowanie jest powszechne w licznych środowiskach pracy.



Rys. 1.4. Schemat budowy pleśni z rodzaju *Aspergillus*: 1 – kolumella, 2 – metule, 3 – fialidy, 4 – konidia, A – konidiofor (źródło: własne CIOP-PIB)

Grzyby mikroskopowe w środowiskach pracy występują przede wszystkim jako składnik bioaerozoli. Ta grupa czynników biologicznych związana jest szczególnie z miejscami, gdzie przetwarzany jest surowiec roślinny, np. zboże, orzechy, kukurydza, trawy, zioła, owoce i warzywa.

W wyniku kontaktu bezpośredniego mogą być przyczyną infekcji – mikoz, zwłaszcza u pracowników z obniżoną odpornością. Zwykle mikozy stanowią grzybice powierzchniowe skóry, włosów, paznokci i błon śluzowych oraz grzybice wewnętrzne, m.in. płuc, żołądka, przełyku, oczu czy uszu [35]. Największe zdolności do wywoływania tego typu infekcji przypisuje się drożdżom z rodzaju *Candida* i *Malassezia*, pleśniom z rodzajów *Absidia*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Phoma*, *Rhizopus* oraz zaliczanym do dermatofitów: *Epidermophyton*, *Microsporum*, *Trichophyton*. Dermatofity odpowiedzialne są za wywoływanie grzybic właściwych, produkują keratynazy i inne proteolityczne enzymy, które umożliwiają im hydrolizę keratyny, głównego białka będącego składnikiem włosów, paznokci i skóry. Mechanizm zakażeń dermatofitami stanowi kompleks reakcji biofizycznych, biochemicznych i immunologicznych, które nie zostały jeszcze całkowicie wyjaśnione [36].

Tego typu infekcje najczęściej dotykają pracowników: rolnictwa zajmujących się produkcją zwierzęcą, służby weterynaryjnej, placówek dermatologicznych i laboratoriów mikrobiologicznych, ośrodków naukowych mających kontakt ze zwierzętami lub materiałem biologicznym pochodzenia zwierzęcego, garbarni, a także fryzjerów i kosmetyczek [9].

Szacuje się, że aż 40% populacji ludzkiej może wykazywać nadwrażliwość na pleśnie. Objawów alergii na pleśnie może być wiele. Najczęściej są to alergia wziewna, odczyn zapalny błon śluzowych nosa, gardła, nadreaktywność oskrzeli, astma oskrzelowa, alergia kontaktowa, pokarmowa oraz AZPP [37,38]. Większość przypadków AZPP to choroby pochodzenia zawodowego związanego właśnie z narażeniem na pleśnie. W licznych przypadkach można spotkać się z określeniami AZPP, wskazującymi wprost na narażoną grupę zawodową, np. „płuco

stolarzy i pracowników papierni", „płuco leśników", „płuco hodowców tytoniu", „płuco pracowników browarów i słodowni", „płuco winiarzy", „płuco prowadzących traktory klimatyzowane", „płuco kompostowników", „płuco szatkujących paprykę", „płuco serowarów" [38-40].

Podkomitet do Spraw Nomenklatury Alergenów Światowej Organizacji Zdrowia (WHO/IUISA) zamieszcza na swojej stronie internetowej aktualne informacje dotyczące charakterystyki alergenów pochodzenia roślinnego zwierzęcego i grzybowego. Obecnie w wykazie tym znajduje się aż 112 alergenów pleśni należących do rodzajów: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Curvularia*, *Epicoccum*, *Fusarium*, *Stachybotrys*, *Rhizopus i Trichophyton* oraz 5 alergenów drożdży z rodzajów Candida i Rhodotorula [41].

Nadwrażliwość na pleśnie występuje powszechnie w wielu miejscach pracy. Wykazano, że uczulenie *Rhizopus nigricans* może powodować występowanie astmy zawodowej u górników [42].

Inne zagrożenia zdrowia pracowników, związane z obecnością pleśni w miejscu pracy, wynikają z ich potencjalnej zdolności do produkcji toksyn (mikotoksyn). Są to toksyczne związki organiczne o masie cząsteczkowej od 200 do 800 Da, powstające podczas metabolizu wtórnego pleśni. Mikotoksyny mogą być wydzielane przez pleśnie bezpośrednio do powietrza, ale częściej znajdują się w nim jako składnik zarodników lub fragmentów strzępków. Obecnie znanych jest ponad 400 mikotoksyn wytwarzanych przez 350 gatunków pleśni, jednakże ciągle odkrywane są nowe ich toksyczne metabolity [43]. Do pleśni o największym potencjale toksynotwórczym należy zaliczyć gatunki z rodzajów *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium oraz Stachybotrys*. Przykłady najważniejszych mikotoksyn wytwarzanych przez te pleśnie pokazano na rys. 1.5.

Największe znaczenie kliniczne przypisuje się aflatoksynom, ochratoksynie A, trichotecenom, satratoksynie oraz zearalenonowi. Wykazano, iż inhalacja mikotoksyn może mieć do dziesięciu razy silniejszy efekt toksyczny niż narażenie przez skórę, pokarmowe lub dootrzew-

nowe. Prawdopodobnie związane jest to ze zwiększoną powierzchnią kontaktu oraz łatwym przenikaniem mikotoksyn przez ściany naczyń włosowatych w pęcherzykach płucnych [44].

Rys. 1.5. Przykłady toksynotwórczych pleśni i produkowanych przez nie mikotoksyn (źródło: własne PŁ)

Narażenie na mikotoksyny może skutkować mikotoksykozami zarówno o charakterze ostrym, jak i przewlekłym. Udowodniono, iż długotrwała ekspozycja na niskie dawki mikotoksyn może przyczynić się do osłabienia zdolności obronnych organizmu i być groźniejsza w skutkach niż mikotoksykozy o przebiegu ostrym. Mikotoksyny, w zależności od konkretnego związku chemicznego, wykazują działanie genotoksyczne, mutagenne, teratogenne, rakotwórcze, estrogenne, cytotoksyczne oraz immunosupresyjne (rys. 1.6.). Konsekwencje zdrowotne związane z narażeniem na toksyczne metabolity pleśni obejmują nowotwory wątroby, nowotwory krwi, uszkodzenia nerek, spadek produkcji krwinek, zmniejszenie krzepliwości krwi, zaburzenia funkcji rozrodczych oraz wiele innych schorzeń [43,45].

Rys 1.6. Zestawienie aktywności biologicznej wybranych mikotoksyn w środowisku pracy (źródło: własne PŁ)

Do grup zawodowych, zagrożonych oddziaływaniem mikotoksyn, zalicza się rolników, ogrodników i producentów kompostów, bibliotekarzy, archiwistów, konserwatorów zabytków i pracowników muzeów, pracowników tartaków, leśnictwa, spichrzów zbożowych, młynów, piekarni, mieszalni pasz, sortowni i składowisk odpadów [9]. Badania epidemiologiczne przeprowadzone w Holandii sugerują występowanie korelacji między narażeniem zawodowym na aflatoksyny a nowotworami wątroby i innych narządów. Podobne hipotezy dotyczą występowania związku między zawodową ekspozycją na pył orzeszków ziemnych zanieczyszczony pleśniami i metabolitami *Aspergillus flavus* a rakiem płuc [44]. Narażenie na mikotoksyny może prowadzić również do hemosyderozy płuc (Idiopathic Pulmonary Haemosiderosis; IPH) – oddziaływania toksycznego, które opisano po długotrwałej ekspozycji na pleśń *Stachybotrys chartarum*. Choroba ta charakteryzuje się hemolizą krwi, obecnością hemoglobiny w moczu oraz pękaniem naczyń krwionośnych płuc [46].

Grzyby strzępkowe, oprócz mikotoksyn i alergenów, są również źródłem mikrobiologicznych lotnych związków organicznych – MVOCs (Microbial Volatile Organic Compounds), w skład których wchodzą

przede wszystkim: alkohole, aldehydy, ketony, aminy, terpeny, związki siarki oraz węglowodory chlorowane. Tego typu związki mogą być również wytwarzane przez drożdże. Większość związków zaliczanych do MVOCs wykazuje właściwości drażniące, toksyczne i rakotwórcze [47]. Ponadto związki te często są trwałe i mogą przez długi czas utrzymywać się w powietrzu pomieszczeń zamkniętych. MVOCs uważane są za jedną z przyczyn syndromu chronicznego zmęczenia (Chronic Fatique Syndrome; CFS) i syndromu chorego budynku (Sick Building Syndrome; SBS). Schorzenia te obejmują liczne objawy, takie jak: katar, kaszel, objawy ze strony błon śluzowych oczu, nosa, gardła, bóle głowy, zaburzenia pamięci, snu, wysypki skórne, objawy podobne do astmy. CFS i SBS najczęściej występują u osób pracujących w biurach, szkołach, szpitalach, domach opieki społecznej oraz w budynkach o złym stanie technicznym lub sanitarnym [48-51].

Podejrzewa się, że czynnikiem etiologicznym obu schorzeń są również inne związki pochodzenia grzybowego – (1-3)-β-D-glukany, będące budulcem ściany komórkowej pleśni. Inhalacja tych związków wywołuje objawy ze strony górnych dróg oddechowych, jak również indukuje wytwarzanie czynników prozapalnych (cytokin i monocytów), wywołując astmę i alergię. Ponadto (1-3)-β-D-glukany pobudzają układ immunologiczny do stałej aktywności [50-52].

Piśmiennictwo

1. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 roku w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki (Dz. U. Nr 81 poz.716 z późn. zm.).
2. Chmiel M.J., Frączek K., Grzyb J., Problemy monitoringu zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 2015 (I–III). T. 15. Z. 1 (49): 17-27.
3. Kummer V., Thiel, W. R. Bioaerosols – Sources and control measures. Int. J. Hyg. Environ-Health 2008,211(3-4): 299–307.

4. Górny R.L. Szkodliwe czynniki biologiczne w środowisku pracy. Promotor BHP 2012,10: 10-15.

5. Srikanth P., Sudharsanam S., Steinberg R. Bio-aerosols in indoor environment: composition, health effects and analysis. Indian J Med Microbiol. 2008,26(4): 302-312.

6. Douwes J., Thorne P., Pearce N., Heederik D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. Ann Occup Hyg. 2003,47(3): 187-200.

7. Kulkarni P., Baron P.A., Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications. John Wiley and Sons Inc., New York 2011.

8. Kozajda A., Szadkowska-Stańczyk I., Zawodowa ekspozycja na czynniki biologiczne stosowane w sposób celowy w Polsce. Med Pr 2015,66(1): 39–47

9. Dutkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L., Szymańska J. Biologiczne czynniki zagrożenia zawodowego. Klasyfikacja, narażone grupy zawodowe, pomiary, profilaktyka. Ad punctum. Lublin 2018.

10. Libudzisz Z., Kowal K., Żakowska Z. Mikrobiologia techniczna. Tom 1. Mikroorganizmy i środowiska ich występowania. PWN, Warszawa 2019.

11. Bisen P.S., Debnath M., Prasad G.B.K.S. Microbes: concepts and applications. Hoboken, Wiley-Blackwell 2012.

12. Roży A., Jaguś P. Chorostowska-Wynimko J. Zakażenia wirusowe układu oddechowego w środowisku pracy służby zdrowia. Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka 2014,4: 27-29.

13. Bilski B., Wysocki J., Hemerling M. Viral Hepatitis in health service workers in Province of Wielkopolska. Int J Occup Med. Environ Health 2002,15: 347-352.

14. Pepłońska B., Szeszenia-Dąbrowska N. Choroby zawodowe pracowników szpitali, 2001. Med Pr 2002,53: 369-347.

15. Rodríguez-Lázaro D., Cook N., Ruggeri F.M., Sellwood J., Nasser A., Nascimento M.S., D'Agostino M., Santos R., Saiz J.C., Rzeżutka A., Bosch A., Gironés R., Carducci A., Muscillo M., Kovač K., Diez-Valcarce M., Vantarakis A., von Bonsdorff C.H., de Roda Husman A.M., Hernández M., van der Poel W.H. Virus hazards from food, water and other contaminated environments. FEMS Microbiol Rev. 2012, 36(4): 786-814.

16. Blachere F.M., Lindsley W.G., McMillen C.M., Beezhold D.H., Fisher E.M., Shaffer R.E., Noti J.D. Assessment of influenza virus exposure and recovery from contaminated surgical masks and N95 respirators. J Virol Methods. 2018,260: 98-106.

17. Pulit-Penaloza J.A., Belser J.A., Tumpey T.M., Maines T.R. Swine-Origin H1 Influenza Viruses Isolated from Humans Exhibit Sustained Infectivity in an Aerosol State. Appl Environ Microbiol. 2019,85(10): 00210-19.

18. Kucharska I., Michulec B. Grypa w sezonie epidemicznym 2018/2019 w Polsce i Europie. Rządowe Centrum Bezpieczeństwa. https://rcb.gov.pl/grypa-w-sezonie-epidemicznym-2018-2019-w-polsce-i-europie/ (dostęp. 10.12.2019).

19. Centers for Disease Control and Prevention: Avian influenza (bird flu). https://www.cdc.gov/flu/avianflu/ (dostęp 14.08.2019).

20. Stobnicka A., Górny R.L. Wirusy jako szkodliwe czynniki biologiczne w środowisku pracy biurowej. Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka 2017,4: 12-15.

21. Dutkiewicz J., Cisak., Sroka J., Wójcik-Fatla A., Zając V. Biological agents as occupational hazards – selected issues. Ann Agr Environ Med. 2011;18(2):286-93.

22. Gliński Z., Kostro K. Zoonotyczne wirusy stale zagrażające człowiekowi Życie Weterynaryjne 2013,88(3): 192-197.

23. Stojek N.M. Bakterie gram-ujemne jako przyczyna zakaźnych chorób pochodzenia zawodowego. [w:] Sochacki E. J. Problemy higieny pracy. Zagrożenia zawodowe w rolnictwie i przemyśle. Zielona Góra: Polskie Towarzystwo Higieniczne 2003,11: 97-116.

24. Krogulska B., Matuszewska R., Krogulski A., Szczotko M., Bartosik M., Maziarka D., Giziński R. Występowanie bakterii z rodzaju Legionella w wodzie technologicznej oraz badania ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu na stanowiskach pracy, na których generowany jest aerozol wodny. Med Pr 2014,65(3): 325-334.

25. Wertheim H.F.L., Nghia H.D.T., Taylor W., Schultsz C. Streptococcus suis: an emerging human pathogen. Clin Infect Dis 2009,48: 617-625.

26. Moore J.E., Corcoran D., Dooley J.S.G, Fanning S., Lucey B., Matsuda M., McDowell D.A. et al. Campylobacter. Vet. Res. 2005,351-382.

27. Skórska C. Alergeny bakteryjne i endotoksyna jako przyczyna chorób zawodowych u rolników. [w:] Sochacki E. J. Problemy higieny pracy. Zagrożenia zawodowe w rolnictwie i przemyśle. Zielona Góra: Polskie Towarzystwo Higieniczne 2003,11: 117-134.

28. Skórska C., Krysińska-Traczyk E., Milanowski J., Cholewa G., Sitkowska J., Góra A., Dutkiewicz J. Response of furniture factory workers to work-related airborne allergens. Ann Agr Environ Med. 2002;9(1): 91-97.

29. Gutarowska B., Skóra J., Stępień Ł., Szponar B., Otlewska A., Pielech-Przybylska K. Assessment of microbial contamination at workposts

in different types of composting plants. J Air Waste Manag Assoc. 2015,65(4): 466–478.

30. Paściak M., Mordarska H., Szponar B., Gamian A. Metody chemiotaksonomiczne w rozpoznawaniu zakażeń wywoływanych przez aktynobakterie. Postępy Hig Med Dośw 2007,61: 403-412.

31. Michalak A., Pawlas K. Endotoksyny jako źródło środowiskowego oraz zawodowego zagrożenia dla zdrowia człowieka. Medycyna Środowiskowa – Environmental Medicine 2013,16(2): 7-13.

32. Liebers V., Raulf-Heimsoth M. Brüning T. Health effects due to endotoxin inhalation (review). Arch Toxicol 2008,82: 203–210.

33. Laitinen S., Kangas J., Husman K., Susitaival P. Evaluation of exposure to airborne bacterial endotoxin and peptydoglycans in selected work environmens. Ann Agr Environ Med 2001,8: 213-219.

34. Schlegel H. G. Mikrobiologia ogólna. Warszawa: PWN; 2004: 201-204.

35. Bellmann R., Bellmann-Weiler R., Weiler S. Pulmonary mycoses. Magazine of European Medical Oncology 2008,1(3): 15-19.

36. Zych M.A., Górska E.B., Jankiewicz U., Kowalczyk P., Stępień W. Medycyna Rodzinna 2013,4: 158-163.

37. Lipiec A. Mould hypersensitivity in patients suffering from allergic rhinitis. Otolaryngol Pol 2000,54: 89-90.

38. Pałczyński C., Wiszniewska M., Szulc B., Walusiak J. Zawodowa ekspozycja na grzyby pleśniowe – opisy przypadków. Alergia 2008,1: 28-31.

39. Blatman KH, Grammer LC. Hypersensitivity pneumonitis. Allergy Asthma Proc 2012,33: S64-6.

40. Girard M, Cormier Y. Hypersensitivity pneumonitis. Curr Opin Allergy Clin Immunol 2010,10: 99-103.

41. Allergen nomenclature WHO/IUIS Allergen Nomenclature Sub-Committee: http://www.allergen.org/ (dostęp 13.08.2019).

42. Gamboa PM, Jauregui I, Urrutia I, et al. Occupational asthma in a coal miner. Thorax 1996,51: 867-68.

43. Chełkowski J. Mikotoksyny, grzyby toksynotwórcze i miko toksykozy. Wyd. Instytut Genetyki Roślin, PAN Poznań 2010.

44. Soroka P.M., Cyprowski M., Szadkowska-Stańczyk I. Narażenie zawodowe na mykotoksyny w różnych gałęziach przemysłu. Med Pr 2008,59(4): 333-345.

45. Grajewski J. Mikotoksyny i grzyby pleśniowe - zagrożenie dla człowieka i zwierząt. Wyd. Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy. Bydgoszcz 2006.

46. Novotny W.E., Dixit A. Pulmonary hemorrhage in an infant following two weeks of fungal exposure. Archives of Pediatric and Adolescent Medicine 2000,154: 271-275.

47. Korpi A., Järnberg J., Pasanen A.L. Microbial volatile organic compounds. Crit Rev Toxicol. 2009,39(2):139-193.

48. Rao C.Y., Cox-Ganser J.M., Chew G.L., Doekes G., White S. Use of surrogate markers of biological agents in air and settled dust samples to evaluate a water-damaged hospital. Indoor Air 2004,15: 89-97.

49. Burge P.S. Sick building syndrome. Occup Environ Med 2004,61: 185-190.

50. Singh J. Toxic moulds and indoor air quality. Indoor Built Environ 2005,14: 229-234.

51. Chapman M.D. Challenges associated with indoor moulds: health effects, immune response and exposure assessment. Med Mycol 2006,44: 529-532.

52. Iossifova Y., Reponen T., Bernstein D., Levin I., Zeigler H., Kalra H., Campo P., Villareal M., Lockey J., Hershey G.K.K., LeMasters G. House dust (1 → 3)-β-D-glucan and wheezing in infants. Allergy 2007,62: 504-513.

2. Narażenie na czynniki biologiczne w różnych środowiskach pracy

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 2005 r. [1] definiuje rodzaje prac, w których występuje narażenie na działanie szkodliwych czynników biologicznych. Wykaz zamieszczony w załączniku 2 obejmuje prace wykonywane w zakładach produkujących żywność, rolnictwie, jednostkach ochrony zdrowia, laboratoriach klinicznych, weterynaryjnych lub diagnostycznych, zakładach gospodarki odpadami oraz przy oczyszczaniu ścieków. Lista zawiera również czynności zawodowe, podczas których dochodzi do kontaktu ze zwierzętami lub produktami pochodzenia zwierzęcego oraz wszelkie prace wykonywane w innych okolicznościach, podczas których potwierdzone jest narażenie na działanie czynników biologicznych. Opublikowana w rozporządzeniu lista jest bardzo ogólna i otwarta. Oznacza to, że dopuszcza się możliwość uwzględniania nowych miejsc pracy, w których pojawia się udokumentowana ekspozycja na tą grupę czynników szkodliwych.

Według literatury przedmiotu narażenie na szkodliwe czynniki biologiczne dotyczy wielu gałęzi gospodarki: przemysłu, rolnictwa i usług. Szacuje się, że problem ten występuje w ponad 150 specjalistycznych grupach zawodowych, należących do 22 kategorii [2]. Liczba miejsc pracy, w których udokumentowane jest takie narażenie, na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat stale wzrasta i obejmuje również środowiska, w których takie ryzyko wydawałoby się mało prawdopodobne.

Narażenie na czynniki biologiczne może wynikać z celowego wykorzystania ich w trakcie pracy. Ma to miejsce chociażby w przemyśle biotechnologicznym, którego pracownicy stosują mikroorganizmy podczas różnorodnych procesów, np. produkcji enzymów pochodzenia mikrobiologicznego. Drugą możliwością jest ekspozycja niezamierzona – szkodliwe czynniki biologiczne obecne są w środowisku pracy, ale są tam niepożądane. Dotyczy to m.in. służby zdrowia, zakładów gospodarki komunalnej, jak również rolnictwa. W tym przypadku

ograniczyć ryzyko kontaktu z mikroorganizmami czy wirusami jest znacznie trudniej [3].

W Polsce Krajowy Rejestr Czynników Biologicznych w Miejscu Pracy prowadzi ewidencję celowego użycia szkodliwych czynników biologicznych. W 2017 r. zgłoszeń celowego użycia czynników biologicznych dokonało 598 przedsiębiorstw. Czynniki biologiczne były najczęściej stosowane w celach związanych z diagnostyką (67,5%) oraz z pracami naukowo-badawczymi (25%), natomiast rzadziej używano ich w celach przemysłowych (7,5%) [3].

W kolejnych podrozdziałach omówiono specyfikę środowisk pracy, w których zagrożenia związane z zawodową ekspozycją na czynniki biologiczne stanowią największy problem pod względem liczby narażonych pracowników oraz konsekwencji tego narażenia.

2.1. Służba zdrowia

Narażenie na szkodliwe czynniki biologiczne dotyczy praktycznie wszystkich pracowników służby zdrowia, w szczególności: lekarzy wszystkich specjalizacji, pielęgniarek, ratowników medycznych, salowych, a także osób zatrudnionych w laboratoriach diagnostycznych i klinicznych. Szacuje się, że największe ryzyko zawodowe występuje wśród:

- pracowników oddziałów zakaźnych, chirurgicznych, pulmonologicznych, hematologicznych, ginekologiczno-położniczych oraz intensywnej terapii i hemodializ,
- stomatologów,
- pediatrów,
- lekarzy rodzinnych,
- pracowników pogotowia ratunkowego i stacji krwiodawstwa [4-7].

Szkodliwe czynniki biologiczne w placówkach służby zdrowia mogą przenosić się:

- w wyniku kontaktu bezpośredniego, np. przez ręce (kontakt ze skórą, tkankami pacjenta podczas leczenia, badania, pielęgnacji),
- w wyniku kontaktu pośredniego, np. z zanieczyszczonymi przedmiotami, narzędziami, powierzchniami, materiałem pochodzącym od pacjentów,
- drogą powietrzną, poprzez aerozol lub krople (np. zakażenie drogą inhalacyjną, zanieczyszczenie błon śluzowych nosa, oczu, aerozol wytwarzany podczas niektórych zabiegów stomatologicznych, chirurgicznych, ortopedycznych wykonywanych narzędziami mechanicznymi i laserowymi [4].

Wyróżnia się także zakażenia krwiopochodne, do których dochodzi w trakcie bezpośredniego kontaktu zakażonej krwi i/lub innych płynów fizjologicznych z ranami (lub nawet niewielkimi uszkodzeniami skóry) oraz błonami śluzowymi (spojówki, jama ustna i nosowa) pracowników. Ryzyko zawodowe tego typu zakażeń spowodowane jest głównie zranieniami poprzez ostre narzędzie, np. zakłuciem skażoną igłą, zakażeniami skaleczonej skóry, połknięciem krwi np. wskutek reanimacji „usta-usta", przedostaniem się krwi do oczu lub ust, czy pogryzieniem w miejscu skaleczenia skóry.

Do najczęściej występujących w wyniku zakażeń krwiopochodnych chorób zaliczyć należy wirusowe zapalenie wątroby typu B (WZWB) lub C (WZWC) oraz ludzki wirus niedoboru odporności (HIV). Według Światowej Organizacji Zdrowia aż 3 miliony spośród około 35 milionów pracowników medycznych na świecie narażonych jest na styczność z patogenami krwiopochodnymi, z czego 2 miliony mogą mieć kontakt z wirusem HBV; około 1 miliona – HCV i 170 tys. HIV [6].

Kolejnym zagrożeniem zawodowym dla pracowników służby zdrowia, opieki społecznej i laboratoriów jest gruźlica, notowana niemal wyłącznie wśród tych grup zawodowych. Czynnikiem etiologicznym gruźlicy są bakterie (prątki) należące głównie do gatunku *Mycobacterium*

tuberculosis. Gruźlica dotyczy najczęściej płuc (gruźlica płucna), ale może również atakować skórę, układ kostny, układ płciowy, ośrodkowy układ nerwowy i inne narządy. Poważnym problemem staje się coraz większa liczba notowanych przez WHO przypadków gruźlicy wielolekooopornej (Multidrug-Drug-Resistant Tuberculosis, MDR-TB) oraz gruźlicy z lekoopornością wielolekową o rozszerzonej oporności prątków (Extensively Drug-Resistant Tuberculosis, XDR-TB).

Do zakażenia gruźlicą najczęściej dochodzi drogą inhalacyjną od prątkującego chorego, który może rozpylać bakterie w czasie kaszlu, kichania, mówienia, a nawet śmiechu. Prątki gruźlicy wykazują małą wrażliwość na niekorzystne warunki środowiska, w tym niską zawartość wody w otoczeniu, utrzymując swoją zjadliwość nawet przez kilka miesięcy, na skutek czego ryzyko zakażenia tymi czynnikami u narażonych osób wzrasta. Szczególnie duże jest ono w takich miejscach, jak sale chorych, zwłaszcza izolatki dla chorych prątkujących, pracownie badań bronchoskopowych, pokoje badań spirometrycznych, sale autopsyjne, chirurgiczne i intensywnej terapii oraz laboratoria diagnostyczne [6].

Inne bakterie, na które narażeni są pracownicy służby zdrowia, to chorobotwórcze gatunki należące do rodzajów: *Actinobacillus*, *Fusobacterium*, *Legionella*, *Neisseria*, *Porphyromonas i Staphylococcus* o działaniu zakaźnym. W tym środowisku pracy notuje się także kandydozy i endogenne reakcje alergiczne powodowane przez drożdże *Candida albicans* [6].

W przypadku pracy w laboratoriach do ekspozycji na czynniki biologiczne drogą inhalacyjną może dojść w trakcie: mieszania, worteksowania, homogenizowania, proszkowania oraz opalania próbek, czyli czynności, które mogą prowadzić do powstania aerozolu. W Stanach Zjednoczonych przeprowadzono badania nad występowaniem zakażeń o charakterze zawodowym u pracowników laboratoriów diagnostycznych. Wykazano w nich, iż zagrożenie występowało w 30% laboratoriów, a najczęstszą jego przyczyną były bakterie *Shigella*, *Brucella*, *Salmonella* i *Staphylococcus aureus* [7]. W odniesieniu do kategorii zakażeń laboratoryjnych opracowano szczegółowe wytyczne dotyczące wyposażenia oraz

procedur niezbędnych w trakcie wykonywania prac o różnym stopniu bezpieczeństwa. W zależności od ryzyka zakażenia i jego następstw wyróżniamy cztery poziomy bezpieczeństwa (Biosafety Levels – BSL), gdzie 1 oznacza minimalny poziom zagrożenia, bez potrzeby wprowadzania dodatkowych środków zapobiegawczych, natomiast 4 – bardzo wysokie zagrożenie i konieczność zastosowania maksymalnych środków ostrożności.

2.2. Przemysł i usługi

Narażenie na szkodliwe czynniki biologiczne występuje w wielu gałęziach przemysłu, głównie w przemyśle spożywczym, biotechnologicznym oraz innym związanym z generowaniem bioaerozoli. W przemyśle spożywczym dominują zakłady przetwórstwa surowców pochodzenia roślinnego (np. zboże, zioła, przyprawy, kawa, herbata) oraz zwierzęcego (mleko, mięso) co sprawia, że są to środowiska pracy, w których występują stałe źródła różnorodnych czynników biologicznych.

Przykładem działu przemysłu spożywczego narażonego na występowanie dużej liczby czynników biologicznych jest przemysł mleczarski. Zajmuje się on produkcją mleka – jego skupem, magazynowaniem, przerobem na produkty mleczne (np. mleko spożywcze, masło, śmietanę, sery, napoje mleczne, lody) oraz ich dystrybucją. Kontakt z surowym mlekiem może stanowić poważne zagrożenie dla pracowników mleczarstwa. Skażone mikrobiologicznie mogą być wszelkie powierzchnie robocze, zbiorniki na mleko czy maszyny, a podczas pracy (np. procesu produkcji, mycia urządzeń i linii produkcyjnej) generowany jest bioaerozol, w którym obecne są często mikroorganizmy chorobotwórcze [8,9].

Mleko krowie charakteryzuje się bardzo bogatą zawartością składników odżywczych: białek, aminokwasów, laktozy, tłuszczu, witamin i mikroelementów. Dlatego też stanowi naturalne podłoże, w którym mikroorganizmy rozwijają się z łatwością. Nawet jeśli udój prowadzony jest w warunkach aseptycznych, mleko nie jest surowcem jałowym. Źródłem drobnoustrojów

są skóra i sierść zwierząt, ściółka, pasza, aparatura służąca do udoju, a także personel. Co więcej, należy wziąć pod uwagę możliwość występowania w mleku wirusów. Przypadki zakażenia nimi produktów mlecznych odnotowano w wielu krajach, także tych o wysokim standardzie higienicznym. W mleku wykrywano m.in. wirusa Coxsackie, wirusa enzootycznej białaczki bydła (BLV) oraz wirusa kleszczowego zapalenia mózgu (TBEV). Potwierdzono również występowanie wirusów pochodzenia jelitowego należących do rodziny pikornawirusów (w tym wirus zapalenia wątroby typu A i E), adenowirusów, reowirusów, parwowirusów oraz kaliciwirusów. W serach, które produkowane są z mleka niepasteryzowanego, odnotowano również obecność rotawirusów i koronawirusów [8,9].

W mleku naturalnie występują bakterie kwasu mlekowego (LAB), które stosowane są także jako kultury starterowe i dodawane do żywności, aby nadać jej odpowiednie cechy organoleptyczne. Pełnią one ważną funkcję w produkcji wyrobów mleczarskich, takich jak jogurty i kefiry. Bakterie kwasu mlekowego zostały uznane za bezpieczne i posiadają status GRAS (ang. Generally Recognised As Safe; uważane za bezpieczne dodatki do żywności). Mimo to należy zwrócić uwagę na fakt, że rozprzestrzeniają się one także w postaci bioaerozoli i mogą się dostać do dróg oddechowych pracowników linii produkcyjnych, a skutki zdrowotne takiej ekspozycji nie zostały do tej pory dokładnie zbadane [8,9].

Branża biotechnologiczna uważana jest za jedną z najnowocześniejszych i najprężniej rozwijających się w Europie. Obejmuje ona przedsiębiorstwa działające w takich obszarach, jak kosmetologia, farmacja, diagnostyka i badania genetyczne, medycyna oraz produkcja preparatów rolniczych. Do najczęstszych produktów tej branży należą leki oraz substancje uzupełniające, szczepionki, biomateriały, a także testy diagnostyczne, probiotyki, suplementy diety i biopreparaty [10]. Narażenie na czynniki biologiczne w przemyśle biotechnologicznym wynika z celowego wykorzystania czynników biologicznych w trakcie

pracy. Pracodawcy i pracownicy mają w takim przypadku świadomość, na jaki mikroorganizm lub substancję pochodzenia mikrobiologicznego są narażeni. Rodzaj czynnika biologicznego jest w takiej sytuacji dokładnie scharakteryzowany, dzięki czemu łatwo jest podjąć działania prewencyjne i ochronne. Zdarzały się jednak przypadki zachorowań pracowników zakładów biotechnologicznych, będące konsekwencją ekspozycji na szkodliwe czynniki biologiczne. Przykładem może być eozynofilowe zapalenie mięśni, spowodowane toksynami produkowanymi przez bakterie *Bacillus amyloliquefaciens*, odnotowane w 1989 r. u pracowników zajmujących się produkcją tryptofanu [11]. Należy jednak zauważyć, że było to jednostkowe zdarzenie w okresie, kiedy wiedza z zakresu biotechnologii oraz świadomość zagrożeń powodowanych szkodliwymi czynnikami były jeszcze mało rozwinięte.

W licznych zakładach przemysłowych występuje narażenie na bakterie z rodzaju Legionella, których źródłem jest aerozol wodny wdychany przez pracowników w trakcie wykonywania czynności zawodowych. Najbardziej podatne na kolonizację tymi bakteriami są systemy przesyłu wody ciepłej (o temperaturze 20-40 °C), których konstrukcja sprzyja zastojom wody i tworzeniu się biofilmów na wewnętrznej powierzchni urządzeń i systemów wodnych [12-14]. Do zakażenia bakteriami *Legionella* dochodzi drogą wziewną. Może ono przybierać formę legionelozy płucnej, przebiegającej pod postacią zapalenia płuc, zwykle o ciężkim przebiegu, z objawami ze strony układu oddechowego lub tzw. gorączki Pontiac, która przebiega z podwyższoną ciepłotą ciała oraz rozlanymi bólami mięśniowymi i stawowymi [12,14].

Doniesienia o przypadkach legionelozy, notowane wśród pracowników zakładów przemysłowych, dotyczą osób zatrudnionych przy obsłudze systemów klimatyzacyjnych i chłodzących oraz różnego rodzaju urządzeń czyszczących i myjących w przemyśle maszynowym i spożywczym, przemysłowych oczyszczalniach ścieków, zakładach ceramicznych, cukrowniach, wytwórniach urządzeń budowlanych oraz silników samochodowych [15-19].

W Polsce prowadzono badania w zakładach obróbki szkła podczas czynności, w trakcie których dochodziło do generowania aerozolu wodnego, takich jak krojenie, szlifowanie, hartowanie, polerowanie, wiercenie otworów w szkle i montaż szyb zespolonych. W badaniach tych stwierdzono zwiększone ryzyko kaszlu oraz zespołu ostrych objawów, które mogą sugerować zapalenie płuc w grupie osób wykonujących pracę w odległości do 20 m od źródła aerozolu wodno-powietrznego, w porównaniu z pozostałymi pracownikami. Co więcej, w wodzie technologicznej stwierdzono obecność bakterii *Legionella pneumophila* w liczbie przekraczającej 1x103 jtk/100 ml (jednostek tworzących kolonie w 100 ml), co wskazuje na zagrożenie zdrowia pracujących tam osób [20].

Szkodliwe czynniki biologiczne występują również w zakładach mechanicznej obróbki metali. Największe narażenie w tego typu zakładach występuje w trakcie wykonywania takich czynności, jak toczenie, frezowanie, wiercenie czy szlifowanie, podczas których stosowane są ciecze chłodzące (oleje obróbcze, emulsje olejowe lub ciecze syntetyczne). W cieczach obróbkowych, na skutek długotrwałego użytkowania, dochodzi do zanieczyszczenia substancjami organicznymi, które sprzyjają namnażaniu się mikroorganizmów: bakterii, pleśni i drożdży.

W polskich fabrykach przemysłu maszynowego stwierdzono zanieczyszczenie chłodziw bakteriami na poziomie od 2,0 x 102 do 1,1 x 108 jtk/ml, pleśniami od 1,0 x 102 do 3,0 x 104 jtk/ml i drożdżami ok. 1,0 x 104 jtk/ml [21-23]. Z cieczy chłodzących izolowano mikroorganizmy zaliczane do 2. grupy zagrożenia: *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas hydrophila*, *Bacillus subtilis*, *Enterobacter sp. Staphylococcus aureus*, *Proteus mirabilis*, *Corynebacterium sp.*, *Escherichia coli*, *Mycobacterium chelonae*, *Aspergillus fumigatus i Candida albicans*. Do najczęściej zgłaszanych przez pracowników objawów chorobowych należą: kaszel z odksztuszaniem, świszczący oddech, ucisk w klatce piersiowej oraz podrażnienie gardła. Wśród jednostek chorobowych notowanych w tej grupie zawodowej wymienić należy przewlekłe zapalenie oskrzeli, astmę, a także ostre zmiany w funkcjonowaniu układu oddechowego

i obniżenie wartości natężonej objętości wydechowej pierwszosekundowej (FEV1) [21]. Pracownicy mający kontakt z mgłą olejową mogą chorować także na AZPP, określane jako „płuco operatora maszyn". Jest ono powodowane zakażeniem bakteriami z rodzaju *Mycobacterium* i objawia się m.in. gorączką, dreszczami, suchym kaszlem, trzeszczeniem u podstawy płuc, dusznościami. Ponadto istnieją przesłanki wskazujące na to, że pracownicy przemysłu motoryzacyjnego częściej zapadają na nowotwory. Wykazano, że praca z olejami obróbczymi może zwiększać śmiertelność z powodu raka krtani, odbytnicy i białaczki [24].

Do grup zawodowych, które narażone są na kontakt ze szkodliwymi czynnikami biologicznymi w miejscu pracy należą również pracownicy oczyszczalni ścieków, kanalizacji, obiektów gospodarki odpadami (sortowni odpadów, przedsiębiorstw zajmujących się odzyskiwaniem surowców z materiałów segregowanych) oraz kompostowni. Szczególnie istotny z punktu widzenia narażenia zawodowego na szkodliwe czynniki biologiczne w przypadku gospodarki ściekami jest etap oczyszczania wstępnego, mechanicznego i biologicznego ścieków oraz zagęszczanie osadu nadmiernego. Oznacza to, że na kontakt ze szkodliwymi czynnikami biologicznymi w oczyszczalniach ścieków narażeni są najbardziej pracownicy zajmujący się mechanicznym oczyszczaniem ścieków i obróbką osadów ściekowych [25-29]. W przypadku gospodarki odpadami wszystkie prace związane z opróżnianiem samochodów dowożących odpady, zgarnianiem, ubijaniem, zamykaniem kwater oraz sortowaniem śmieci, przerzucaniem pryzm kompostowych powodują emisję szkodliwych czynników biologicznych do powietrza i tym samym zagrożenie inhalacyjne dla pracowników.

Ścieki komunalne i odpady uznawane są za potężne źródło czynników biologicznych (wirusów, bakterii, grzybów, endopasożytów). W skład tworzącego się w oczyszczalniach ścieków bioaerozolu wchodzą liczne pałeczki (głównie z rodzaju *Pseudomonas*), gronkowce hemolizujące (np. *Staphylococcus aureus*), paciorkowce hemolizujące (*Streptococcus faecalis*, *Streptococcus pneumoniae*), a także ziarniaki

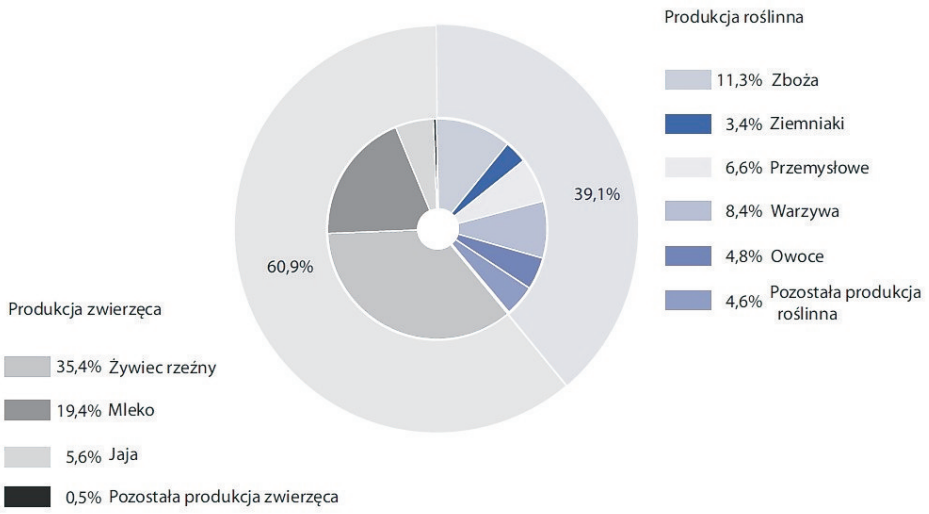
gramujemne, takie jak *Acinetobacter*, laseczki z rodzaju *Bacillus* oraz promieniowce i bakterie z grupy coli. Z kolei wśród identyfikowanych obiektów gospodarowania odpadami bakterii dominują te należące do rodzajów *Micrococcus*, *Steptococcus*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Escherichia* oraz *Enterobacter* [30,31].

Do najczęstszych chorób, wynikających z narażenia na szkodliwe czynniki biologiczne, występujących u pracowników wymienionych grup zawodowych zalicza się: AZPP, nieżyt błon śluzowych nosa i gardła, zapalenie spojówek, biegunki oraz inne infekcje układu pokarmowego, a także uszkodzenia centralnego układu nerwowego. Pracownicy tych zakładów często skarżą się na złe samopoczucie, kaszel oraz trudności w oddychaniu [32-36].

Obecnie rośnie także świadomość zagrożeń szkodliwymi czynnikami biologicznymi wśród pracowników branży utrzymania czystości. Pracownicy tej branży zajmują się przede wszystkim sprzątaniem, tj. zamiataniem, odkurzaniem, myciem podłóg, ścian, okien, toalet, usuwaniem odpadów, czyszczeniem i konserwowacją instalacji wentylacyjnych oraz pracami specyficznymi dla poszczególnych zleceniodawców (np. zmiana pościeli dla pacjentów lub mycie łóżek w szpitalach). Szkodliwe czynniki biologiczne, na które może być narażony pracownik podczas wykonywania prac porządkowych, występują w kurzu domowym, wydalinach i płynach ustrojowych ludzi i zwierząt. Pracownicy branży utrzymania czystości narażeni są przede wszystkim na bakterie (paciorkowce kałowe, bakterie z grupy coli), grzyby (drożdże i pleśnie), roztocza oraz wirusy WZWA, WZWB i WZWC.

Liczne czynniki biologiczne występują również w zakładach fryzjerskich i kosmetycznych, gdzie stanowią one potencjalne zagrożenie dla zdrowia pracowników, jak również klientów. W tego typu placówkach usługowych ryzyko związane jest z bezpośrednim kontaktem personelu z klientem, możliwością skaleczenia (zranienie brzytwą, żyletką, nożyczkami) oraz narażeniem na zakaźny bioaerozol, pochodzący np. od chorych klientów i nosicieli. Dlatego też do czynników stwarzają-

cych największe zagrożenie zaliczyć należy, klasyfikowane do 3. grupy zagrożenia, wirusy WZWB i WZWC, ludzki wirus upośledzenia odporności (HIV-1, HIV-2), bakterie z 2. grupy zagrożenia: *Chlamydia pneumoniae*, *Staphylococcus aureus* i *Stereptococcus pyogenes*, grzyby z 2. grupy zagrożenia: *Epidermophyton floccosum* i *Trihophyton* [39].



Rys. 2.1. Struktura towarowej produkcji rolnej w Polsce w 2017 roku [40]

2.3. Rolnictwo

Rolnictwo to bardzo ważny sektor gospodarki w wielu krajach na całym świecie. Szacuje się, że w Polsce liczba gospodarstw wynosi aż 1405,7 tys. (dane na 2017 r). Większość z nich (73%) stanowią małe gospodarstwa o powierzchni od 1 do 10 hektarów. Strukturę towarowej produkcji rolnej w Polsce, tzn. sumy sprzedaży danych produktów rolnych do skupu oraz na targowiskach przedstawiono na rys. 2.1. W naszym kraju największe znaczenie spośród wszystkich obszarów rolnictwa ma uprawa zbóż oraz chów trzody chlewnej, drobiu i bydła [40].

Specyficzny charakter pracy, tj. jej złożoność, sezonowość, wydłużenie dnia roboczego, polowy charakter w przypadku produkcji roślinnej i nieprzerwany cykl w przypadku produkcji zwierzęcej oraz inne cechy sprawiają, że praca w rolnictwie jest uciążliwa i ma znaczący wpływ na zdrowie pracowników. Rezerwuarem szkodliwych czynników biologicznych w tym środowisku pracy są zwierzęta hodowlane, rośliny, gleba oraz woda [41].

W pomieszczeniach inwentarskich rozwijać się mogą bakterie oraz grzyby stanowiące przyczynę zakażenia, alergii lub zatrucia pracowników rolnych. Sprzyja temu panująca tam temperatura, wynosząca zazwyczaj około 30 °C i wilgotność powietrza powyżej 50%. Ponadto wszelkie substancje pochodzenia zwierzęcego, takie jak pióra, sierść, wydzieliny i wydaliny zwierząt, a także pochodzenia roślinnego, np. ściółka i pasza, z którymi rolnicy stykają się na co dzień, zawierać mogą wytwarzane przez szkodliwe czynniki biologiczne alergeny, mikotoksyny, MVOCs, (1-3)-β-D-glukany, endotoksyny i peptydoglikany [42,43].

Bioaerozol uwalniany jest do powietrza podczas większości prac rolnych – głównie w trakcie prac żniwnych, transportu oraz przetwarzania płodów rolnych, jak również oporządzania zwierząt gospodarskich (np. zadawania pasz). W ten sposób umożliwione jest rozprzestrzenianie się czynników biologicznych. Stężenie drobnoustrojów w pomieszczeniach inwentarskich podczas młócenia zbóż i innych plonów może w skrajnych przypadkach osiągać wartości rzędu 1012 jtk w 1 m^3 powietrza. Bioaerozol obecny jest w dużych ilościach w spichlerzach i młynach zbożowych, brojlerniach, chlewniach, oborach oraz pomieszczeniach służących do uprawy pieczarek.

Istotnym zagrożeniem biologicznym dla rolników są grzyby pleśniowe, których zarodniki mogą być jednym ze składników pyłu organicznego. Najbardziej narażeni są na nie pracownicy zajmujący się zbiorem zbóż z pól, omłotem zbóż, uprawą warzyw i ziół oraz hodowlą trzody chlewnej i bydła (czyszczeniem pomieszczeń inwentarskich, zadawaniem pasz, wywozem obornika). Wdychanie pyłu zanieczyszczonego

zarodnikami grzybów pleśniowych może skutkować alergiami lub chorobami o charakterze toksycznym [44]. Zasadniczą kwestią jest rozmiar cząstek pyłu organicznego. Co najmniej 40% cząstek ma średnicę 4 μm lub mniejszą i stanowi frakcję respirabilną docierającą do obszaru wymiany gazowej (pęcherzyków płucnych), na skutek czego stwarza poważne zagrożenie zdrowotne dla rolników. W niektórych przypadkach, np. w budynkach, w których prowadzi się chów trzody chlewnej, aż 60% cząstek to frakcja respirabilna [45].

W związku z odmienną specyfiką pracy w różnych obszarach rolnictwa każdy z nich charakteryzują inne zagrożenia biologiczne, na które eksponowani są pracownicy. Przykładem mogą być zakłady produkcji zwierzęcej, które w zależności od gatunku hodowanych zwierząt, ich liczby, zagęszczenia i wieku, jak również typu hodowli różnią się między sobą stopniem zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza [42].

Uznaje się, że praca w rolnictwie, podczas której występuje kontakt ze zwierzętami, zwiększa narażenie na działanie szkodliwych czynników biologicznych. Dla pracowników produkcji zwierzęcej niebezpieczne są niegruźlicze prątki z rodzaju *Mycobacterium*. Znajdują się w one pyle, drobinkach gleby oraz produktach odzwierzęcych (mięso, mleko) i zagrażają osobom o obniżonej odporności, ponieważ mogą u nich wywołać zakażenie płuc lub zapalenie węzłów chłonnych.

Również gramujemne pałeczki i promieniowce mogą stwarzać istotne zagrożenie dla zdrowia pracowników rolnych. Wśród tych pierwszych należy wspomnieć zwłaszcza o bakteriach z rodzajów: *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Acinetobacter* oraz *Pantoea*. Mają one silne właściwości alergizujące i endotoksyczne. Wdychanie endotoksyn bakteryjnych prowadzić może do gorączki, skurczów oskrzeli, stanów zapalnych płuc, ODTS i innych objawów [42]. Należy mieć na uwadze, iż niski poziom zanieczyszczenia powietrza bakteriami gramujemnymi nie oznacza braku obecności endotoksyn, ponieważ zachowują one aktywność nawet po degradacji komórek bakterii [46]. Promieniowce mogą być natomiast przyczyną AZPP, tzw. „płuca rolnika". Choroba

ta występuje u osób mających kontakt z sianem, zwłaszcza spleśniałym, słomą i kiszonkami. Antygenami, które wywołują ten typ AZPP, są przede wszystkim promieniowce termofilne (głównie *Saccharopolyspora rectivirgula*, poza tym *Thermoactinomyces* vulgaris), ale także kropidlaki (*Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus umbrosus*). Preferują one środowiska o wysokiej wilgotności i temperaturze 40-60 °C [47].

Najwięcej przypadków zachorowań odnotowuje się na koniec zimy i w początku wiosny, gdy zwierzęta hodowlane karmione są wilgotnym sianem oraz kiszonkami. Wilgotne siano zawiera 20 razy więcej zarodników grzybów niż suche. Dodatkowo brak wentylacji pomieszczeń skutkuje dalszym wzrostem stężenia antygenów w środowisku pracy rolnika [48]. Zarówno *Saccharopolyspora rectivirgula*, jak i *Thermoactinomyces vulgaris* oraz *Aspergillus fumigatus* należą do 2. grupy zagrożenia według klasyfikacji czynników biologicznych [1]. Odnotowano, że mogą one być przyczyną alergii, ponadto A. fumigatus może wytwarzać liczne mikotoksyny [47].

W zakładach produkcji zwierzęcej są obecne także inne grzyby pleśniowe, mogące być czynnikami etiologicznymi chorób o podłożu alergicznym bądź immunotoksycznym. Z powietrza najczęściej izoluje się pleśnie z rodzajów: *Aspergillus* (wspomniany wcześniej *A. fumigatus* oraz *A. flavus* i *A. niger*) oraz *Penicillium* (*P. viridicatum* oraz *P. citrinum*), a także *Cladosporium* i *Scopulariopsis*. Natomiast spośród drożdżopodobnych grzybów najczęściej w bioaerozolu występują rodzaje *Candida*, *Rhodotorula* oraz *Cryptococcus*. Pracownicy, którzy są na nie narażeni, mogą chorować na alergiczny nieżyt nosa, astmę oskrzelową, ODTS czy grzybice skóry [42]. W pomieszczeniach inwentarskich, w których odbywa się chów bydła, powietrze charakteryzuje się obecnością pleśni z rodzajów *Aspergillus* (31%), *Penicillium* (25%), *Rhizopus* (13%), a także drożdży (22%). Mniejszy udział mają natomiast pleśnie z rodzajów *Alternaria*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor* oraz *Scopulariopsis* [46].

Znaczący wzrost spożycia drobiu i produktów pochodzenia drobiowego spowodował w ostatnich latach intensyfikację hodowli na fermach drobiu, a przez to generowanie coraz większych ilości pomiotu drobiowego. Może on być źródłem czynników biologicznych, klasyfikowanych do 3. grupy zagrozenia: *Bacillus anthracis*, *Chlamydia ornitozy*, *Salmonella choleraesuis* var. Typhi, wirus H5N1 oraz mikroorganizmów z 2. grupy zagrożenia, takich jak *Aspergillus fumigatus*, *Candida albicans*, *Cryptococcus neoformans*, *Listeria monocytogenes*, *Mycoplasma sp.*, *Staphylococcus sp.*, *Streptococcus sp.* i innych [2,49-51].

Ponadto wykazano, że na fermach drobiu stężenie pyłu organicznego, będącego nośnikiem szkodliwych czynników biologicznych, jest znacznie większe niż w pomieszczeniach do hodowli trzody chlewnej i bydła [52]. Wśród pracowników ferm drobiu odnotowano po 5 latach narażenia zawodowego przewlekłe objawy ze strony układu oddechowego, zaburzenia czynności płuc, nieżyt nosa i egzemę [53].

Piśmiennictwo

1. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki. Dz.U. 2005 nr 81 poz. 716).
2. Dutkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L., Szymańska J. Biologiczne czynniki zagrożenia zawodowego. Klasyfikacja, narażone grupy zawodowe, pomiary, profilaktyka. Ad punctum, Lublin 2018.
3. Kozajda A. Celowe użycie czynników biologicznych w Polsce na podstawie danych z krajowego rejestru czynników biologicznych. Med Pr 2018, 69(4): 413-424.
4. Górny R.L. Szkodliwe czynniki biologiczne w środowisku pracy. Promotor BHP 2012,10: 10-15.
5. Ławniczek-Wałczyk A., Gołofit-Szymczak M., Cyprowski M., Górny R. Szkodliwe czynniki biologiczne w gabinetach stomatologicznych. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2012,492(9): 20-23.

6. Świątkowska B. Zagrożenia zawodowe pracowników opieki zdrowotnej: Co wiemy i co możemy zrobić? Probl. Hig. Epidemiol. 2010,91(4): 522-529.

7. Kozajda A., Szadkowska-Stańczyk I. Ochrona pracowników medycznych laboratoriów diagnostycznych przed narażeniem na czynniki biologiczne. Med Pr 2011,62(3): 291-295.

8. Stobnicka-Kubiec A. Szkodliwe czynniki biologiczne w środowisku pracy zakładów przemysłu mleczarskiego. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2018,559(4): 8-11.

9. Zeilfelder B., Chouanière D., Reboux G., Vacheyrou M., Milon A., Wild P., Oppliger A. Health effects of occupational exposure in a dairy food industry, with a specific assessment of exposure to airborne lactic acid bacteria. Ann. Occup. Environ. Med. 2012;54(8): 969-973.

10. Bogdali A. Charakterystyka rynku biotechnologicznego w Polsce. Zeszyty Naukowe Towarzystwa Doktorantów UJ, Nauki Ścisłe 2013,6(1): 221-226.

11. Ferrari M., Colombi A., Imbriani M. Occupational risk and prevention in the biotechnology industry: a review. Med Lav. 2006,97(5): 651-675. [in Italian]

12. Carratala J., Garcia-Vidal C. An update on Legionella. Curr. Opin. Infect. Dis. 2010,23: 152-157.

13. Kusnetsov J.M., Martikainen P.J., Jousimies-Somer H.R., VälsäNen M.L., Tulkki A.J., Ahonen H.E. i wsp. Physical, chemical and microbiological water characteristics associated with the occurrence of Legionella in cooling tower systems. Water Res. 1993,27: 85-90.

14. Breiman R.F., Butler J.C. Legionnaires' disease: clinical, epidemiological and public health perspectives. Semin. Respir. Infect. 1998,13: 84-89.

15. Bellido-Blasco J.B., Pelaz Antolin C., Delas-Gonzales M.A., Sarrión-Martinez J., Moreno-Muñoz M.R., Herrero-Carot C. Aggregation of casus of Legionella pneumonia in workers related to the ceramic industry in Castellon, Spain 2006. Rev. Esp. Salud Publica 2008,82: 111-116.

16. Castor M.L., Wagstrom E.A., Danila R.N., Smith K.E., Naimi T.S., Besser J.M. i wsp. An outbreak of Pontiac fever with respiratory distress among workers performing high pressure cleaning at a sugar-beet processing plant. J. Infect. Dis. 2005,191: 1530-1537.

17. Fry A.M., Rutman M., Allan T., Salehi E., Benson R., Fields B. i wsp. Legionnaires' disease outbreak in an automobile engine manufacturing plant. J. Infect. Dis. 2003,187: 1015-1018.

18. Allen K.W., Prempeh H., Osman M.S. Legionella pneumophila from a novel industry aerosol. Commun. Dis. Public Health 1999,2:294-296.

19. Kusnetsov J., Neuvoen L.K., Uldum S.A., Mentula S., Putus T., Tran Minh N.N. i wsp. Two Legionnaires' disease cases associated with industrial waste treatment plants: A case report. BMC Infect. Dis. 2010,343: 1-8.

20. Krogulska B., Matuszewska R., Bartosik M., Krogulski A., Szczotko M., Maziarka D., Analiza występowania dolegliwości i objawów ze strony układu oddechowego u osób zatrudnionych w przemyśle na stanowiskach pracy generujących aerozol wodny. Badania pilotażowe jakości mikrobiologicznej powietrza i wody technologicznej. Med. Pr 2013,64(1): 47-55.

21. Cyprowski M., Kozajda A., Zielińska-Jankiewicz K., Szadkowska-Stańczyk I. Szkodliwe działanie czynników biologicznych uwalnianych podczas procesów obróbki metali z użyciem chłodziw. Med Pr 2006,57(2): 139-147.

22. Dilger S., Fluri A., Sonntag H.G. Bacterial contamination of preserved and non-preserved metalworking fluids. Int. J. Hyg. Environ. Health 2005,208: 467-476.

23. Moore J.S., Christensen M., Wilson R.W., Wallace Jr. R.J., Zhang Y., Nash D.R. i wsp. Mycobacterial contamination of metalworking fluids: involvement of a possible new taxon of rapidly growing mycobacteria. AIHAJ 2000,61: 205-213.

24. Tolbert P.E., Eisen E.A., Pothier L.J., Monson R.R., Hallock M.F., Smith T.J.: Mortality studies of machining-fluid exposure in the automobile industry II. Risk associated with specific fluid types. Scand. J. Work Environ. Health 1992,18: 351-360.

25. Cyprowski M., Buczyńska A., Szadkowska-Stańczyk I. Ocena narażenia na bioaerozole pracowników kanalizacji. Med Pr 2006,57(6): 525-530.

26. Prażmo Z., Krysińska-Traczyk E., Skórska C., Sitkowska J., Cholewa G., Dutkiewicz J. Expsure to bioaerosols in a municipal sewage treatment plant. Ann. Arg. Environ. Med., 2003,10: 241-248.

27. Mulloy K.B. Sewage workers: toxic hazards and health effects. Occup. Med. 2001,16: 23-38.

28. Ambekar A.N., Bhardawaj R.S., Joshi S.A., Kagal A.S., Bal A.M. Sero surveillance of leptospirosis among sewer workers in Pune. Indian J. Public Health 2004,48(1): 27-29.

29. Ławniczek-Wałczyk A., Gołofit-Szymczak M., Cyprowski M., Stobnicka A., Górny R.L. Monitoring of bacterial pathogens at workplaces in power plant using biochemical and molecular methods. Int Arch Occup Environ Health 2017,90: 285-295.

30. Gutarowska B., Skóra J., Stępień Ł., Szponar B., Otlewska A., Pielech-Przybylska K. Assessment of microbial contamination at workposts in different types of composting plants. J Air Waste Manage 2015,65(4): 466-478.

31. Kozajda A., Sowiak M., Piotrowska M., Szadkowska-Stańczyk I. Sortownia odpadów komunalnych – rozpoznanie narażenia na czynniki biologiczne (grzyby strzępkowe). Med Pr 2009,60(6): 483-490.

32. Nadal M., Inza I., Schuhmacher M., Figueras M.J., Domingo J.L. Health risks of the occupational exposure to microbiological and chemical pollutants in a municipal waste organic fraction treatment plant. Int. J. Hyg. Environ. Health 2009,212: 661-669.

33. Persoons R., Parat S., Stoklov M., Perdrix A., Maitre A. Critical working tasks and determinants of exposure to bioaerosols and MVOC at composting facilities. Int. J. Hyg. Environ. Health 2010,213: 338-347.

34. Fischer G., Müller T., Schwalbe R., Ostrowski R., Dott W. Exposure to airborne fungi, MVOC and mycotoxins in biowaste handling facilities, Int. J. Hyg. Environ. Health 2000,203: 97-104.

35. Buczyńska A., Sowiak M., Szadkowska-Stańczyk I. Ocena ekspozycji zawodowej na drobnoustroje mezofile podczas prac związanych z produkcją podłoża do przemysłowej uprawy grzybów. Med Pr 2008,59: 373-379.

36. Domingo J.L., Nadal M. Domestic waste composting facilities: a review of human health risks. Environ. Int. 2009,35: 382-389.

37. Gołofit-Szymczak M., Jeżewska A., Ławniczek-Wałczyk A., Górny R.L. Narażenie pracowników konserwujących instalacje wentylacyjne na szkodliwe czynniki biologiczne i chemiczne. Med Pr 2012,63(6): 711-722.

38. Gołofit-Szymczak M., Górny R.L., Ławniczek-Wałczyk A., Cyprowski M., Stobnicka A. Aerozole bakteryjne i grzybowe w środowisku pracy firm sprzątających. Med Pr 2015,66(6): 779-791.

39. Szewczyńska M., Gołofit-Szymczak M., Roman-Liu D., Mikulski W. Zagrożenia czynnikami chemicznymi, biologicznymi, biomechanicznymi i hałasem w małych zakładach fryzjersko-kosmetycznych. Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2010.

40. Główny Urząd Statystyczny, Departament Rolnictwa 2018. Rolnictwo w 2017 r.

41. https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5507/3/14/1/rolnictwo_w_2017.pdf [dostęp: 30.05.2019]

42. Dutkiewicz J., Cisak E., Sroka J., Wójcik-Fatla A., Zając V. Biological agents as occupational hazards – selected issues. Ann. Agr. Env. Med. 2011,18(2): 286-293.

43. Ławniczek-Wałczyk A., Górny R.L., Gołofit-Szymczak M., Cyprowski M., Stobnicka A. Zagrożenia biologiczne związane z produkcją zwierzęcą. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2014,4(511): 14-17.

44. Szewczyk H. Rolnicze choroby zawodowe i parazawodowe. Wieś i Rolnictwo 2012,3: 97-112.

45. Solecki L. XVII Międzynarodowe Seminarium Ergonomii, Bezpieczeństwa i Higieny Pracy w Rolnictwie. Zagrożenia czynnikami biologicznymi w rolnictwie – dotychczasowe i nowe problemy. Med Pr 2011,62(1): 79-84.

46. May S., Romberger D.J., Poole J.A. Respiratory health effects of large animal farming environments. J. Toxicol. Environ. Health 2012,15: 524-541.

47. Matković K., Vučemilo M., Vinković B., Šeol B., Pavičić Ž., Matković S. Qualitative structure of airborne bacteria and fungi in dairy barn and nearby environment. Czech Journal of Animal Science 2007,52(8): 249-253.

48. Pereira C.A., Gimenez A., Kuranishi L., Storrer K. Chronic hypersensitivity pneumonitis. J Asthma Allergy 2016,9: 171-181.

49. Lewandowska K. Alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych. Postępy Nauk Medycznych 2011,4: 274-285.

50. Nimmermark S., Lund V., Gustafsson G., Eduard W. Ammonia, dust and bacteria in welfareoriented systems for laying hens. Ann. Agr. Env. Med. 2009,16: 103-113.

51. Rimac D., Macan J., Varnai V.M., Vucemilo M., Matkovic K., Prester L., Orct T., Trosic I., Pavicic I.. Exposure to poultry dust and health effects in poultry workers: Impact of mould and mite allergens. Int Arch Occup Environ Health 2010,83: 9-19.

52. Skóra J., Matusiak K., Wojewódzki P., Nowak A., Sulyok M., Ligocka A., Okrasa M., Hermann J., Gutarowska B. Evaluation of microbiological and chemical contaminants in poultry farms. Int J Environ Res Public Health. 2016,4;13(2): 192.

53. Herron S.L., Brye K.R., Sharple A.N., Miller D.M., Daniels M.B. Nutrient composition of dust emitted from poultry broiler houses in Northwest Arkansas. J. Environ. Prot. 2015,6: 257-1267.

54. Donham K.J., Cumro D., Reynolds S.J., Merchant J.A. Dose-response relationships between occupational aerosol exposures and cross--shift declines of lung function in poultry workers: Recommendations for exposure limits. J. Occup. Environ. Med. 2000,42: 260-269.

3. Uregulowania prawne w Polsce i Unii Europejskiej

W krajach UE istnieje szereg obszarów związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa pracownikom pracującym w warunkach narażenia życia i zdrowia. Niektóre z nich dotyczą oceny ryzyka zawodowego i związanych z tym podstawowych obowiązków pracodawców, inne – zagadnień technicznych.

Podstawowy akt prawny stanowi dyrektywa ramowa dotycząca bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w miejscu pracy (dyrektywa 89/391/EWG) [1]. Przyjęta w 1989 r. była znaczącym krokiem w dążeniu do podniesienia poziomu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. Gwarantuje ona wprowadzenie w całej UE minimalnych wymagań w tym obszarze. Państwa członkowskie mogą utrzymać ten poziom lub wprowadzić bardziej rygorystyczne środki bezpieczeństwa. Wprowadzono pojęcie „środowiska pracy" zgodne z Konwencją Międzynarodowej Organizacji Pracy (MOP) nr 155 i zdefiniowano nowoczesny sposób podejścia, uwzględniający zarówno kwestie bezpieczeństwa technicznego, jak i zapobieganie chorobom.

Dyrektywa zobowiązuje pracodawców do podjęcia odpowiednich środków zapobiegawczych w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w pracy. Jako kluczowy element wprowadza zasadę oceny ryzyka i określa jej główne punkty, takie jak identyfikacja zagrożeń, udział pracowników, wprowadzenie odpowiednich środków, które mają na celu przede wszystkim wyeliminowanie zagrożenia u źródła oraz dokumentowanie i okresową ocenę zagrożeń w miejscu pracy. Dyrektywa została wdrożona do prawa polskiego na mocy ustawy zasadniczej [2].

Oprócz dyrektywy ramowej przyjęto szereg dyrektyw szczegółowych dotyczących poszczególnych aspektów bezpieczeństwa i zdrowia w miejscu pracy. W przypadku, gdy dyrektywy szczegółowe zawierają bardziej rygorystyczne i szczegółowe przepisy, są one nadrzędne w stosunku do dyrektywy ramowej. Dokumenty te dostosowują

ogólne zasady bezpieczeństwa i ochrony zdrowia do określonych zadań, zagrożeń, stanowisk pracy i branż, a także grup pracowników. W dyrektywach szczegółowych określono sposoby oceny poszczególnych zagrożeń i w niektórych przypadkach ustanowiono wartości graniczne określonych substancji lub czynników.

W związku z narażeniem na szkodliwe czynniki biologiczne i sposobem ochrony pracowników przed tymi czynnikami należy rozpatrywać dwie dyrektywy szczegółowe:

- 2000/54/WE – dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy (siódma dyrektywa szczegółowa) [3],
- 89/656/EWG – dyrektywa Rady w sprawie minimalnych wymagań w dziedzinie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników korzystających z wyposażenia ochronnego (trzecia dyrektywa szczegółowa) [4].

Drugim nurtem prawnym obowiązującym na terenie UE są Dyrektywy Nowego Podejścia. Należą one do przepisów, które pozwalają na swobodny przepływ wyrobów spełniających zasadnicze wymagania bezpieczeństwa względem ludzi, zwierząt i środowiska. Dyrektywy Nowego Podejścia to regulacje prawne obowiązkowe do wprowadzenia przez wszystkich członków UE. Ich celem jest stworzenie jednolitego systemu przepisów, który ma likwidować bariery techniczne. Dyrektywy Nowego Podejścia mówią między innymi o znaku CE. Postanowienia tych dyrektyw zostały ograniczone do wymagań zasadniczych, które musi spełnić wyrób wprowadzany do obrotu i/lub do użytku na rynek UE. Specyfikacje techniczne wyrobów spełniających wymagania zasadnicze, przedstawione w dyrektywach, są określone w normach zharmonizowanych. Normy te podają metody badawcze i kryteria oceny, których spełnienie gwarantuje wypełnienie wymagań zasadniczych przedstawionych w dyrektywach.

Zastosowanie zharmonizowanych lub innych norm pozostaje dobrowolne, a producent może zawsze zastosować inne specyfikacje techniczne w celu wypełnienia zasadniczych wymagań. Należy jednak podkreślić, że wyroby wytworzone zgodnie z normami zharmonizowanymi korzystają z domniemania zgodności z odpowiednimi wymaganiami zasadniczymi. Oznacza to, że ta zasada dotyczy jedynie norm zharmonizowanych.

Dyrektywy Nowego Podejścia mające zastosowanie do dwóch grup wyrobów stosowanych do ochrony ludzi przed czynnikami biologicznymi to:

- rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG [5],
- rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych, zmiany dyrektywy 2001/83/WE, rozporządzenia (WE) nr 178/2002 i rozporządzenia (WE) nr 1223/2009 oraz uchylenia dyrektyw Rady 90/385/EWG i 93/42/EWG [6].

Certyfikacja wymienionych grup wyrobów prowadzi do wystawienia przez producenta/upoważnionego przedstawiciela deklaracji zgodności z postanowieniami wymienionych rozporządzeń oraz oznaczenia wyrobów znakiem CE.

Znaczącą różnicę stanowi przeznaczenie wyrobów. Wyroby podlegające ocenie na zgodność z wymaganiami zasadniczymi rozporządzenia UE 2016/425 to środki ochrony indywidualnej (ŚOI), które, noszone lub trzymane przez pracownika, są przeznaczone do ochrony przed jednym lub wieloma zagrożeniami. Rozporządzeniu UE 2017/745 podlegają natomiast wyroby medyczne, stosowane w zakładach opieki zdrowotnej i służące do ochrony pacjenta przed zagrożeniami przenoszonymi przez personel medyczny.

3.1. Ochrona pracowników przed czynnikami biologicznymi

W krajach Unii Europejskiej zagadnienia dotyczące ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych reguluje dyrektywa o numerze 2000/54/WE z dnia 18 września 2000 r. Określa ona obowiązki pracodawcy dotyczące oceny i dokumentowania ryzyka zawodowego związanego z wykonywaną pracą, stosowania niezbędnych środków profilaktycznych zmniejszających ryzyko oraz informowania pracowników o ryzyku zawodowym, a także zapewnienia właściwej ochrony przed zagrożeniami. Została ona wprowadzona do prawa polskiego na mocy rozporządzenia Ministra Zdrowia (MZ) z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki [7].

Według terminologii stosowanej we wspomnianym rozporządzeniu, czynniki biologiczne oznaczają wszystkie 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. Czynniki te zaklasyfikowano do czterech grup zagrożenia w zależności od ich zdolności wywoływania zakażenia oraz dostępności metod profilaktyki lub leczenia (tab. 3.1.).

Ocena ryzyka zawodowego związanego z narażeniem pracowników na działanie czynników biologicznych powinna być przeprowadzona przed wyborem środków zapobiegawczych eliminujących lub minimalizujących ryzyko zakażenia. Pracodawca, oprócz obowiązku informowania pracowników o zagrożeniu, jest zobligowany do podjęcia wszelkich możliwych działań w celu jego zminimalizowania. Ocena ryzyka powinna być regularnie aktualizowana z uwzględnieniem zmian warunków pracy istotnych dla zdrowia pracowników.

Najważniejszy dotychczas wykaz rodzajów i gatunków szkodliwych czynników biologicznych opracowany został w postaci załącznika nr III do dyrektywy 2000/54/WE. Wykaz ten zawiera listę 375 szkodliwych czynników biologicznych obejmujących 151 bakterii, 129 wirusów i prionów, 69 pasożytów, pierwotniaków i robaków oraz 26 grzybów.

Tabela 3.1. Klasyfikacja szkodliwych czynników biologicznych zgodnie z rozporządzeniem MZ (źródło: opracowanie własne na podstawie [30])

Grupa	Poziom ryzyka zakażenia	Dostępność metod profilaktyki lub leczenia
1.*	wywołanie chorób u ludzi jest mało prawdopodobne	nie dotyczy
2.	mogą wywołać chorobę u ludzi oraz mogą być niebezpieczne dla pracowników, ale rozprzestrzenienie ich w populacji ludzkiej jest mało prawdopodobne	zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia
3.	wywołują u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, a rozprzestrzenienie ich w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne	zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia
4.	wywołują u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, a rozprzestrzenienie ich w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne	zazwyczaj nie istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia

*niewyszczególnione w wykazie szkodliwych czynników biologicznych dołączonym do rozporządzenia MZ

Z grupy 1. zagrożenia warto wymienić: osłabione szczepy bakterii stosowane w produkcji szczepionek, szczepy bakterii i drożdży wykorzystywane w produkcji np. *Saccharomyces cerevisiae* (wyroby piekarnicze), pleśnie o potencjalnym działaniu uczulającym, np. *Aspergillus niger*. Warunkiem zachowania bezpieczeństwa w przypadku występowania czynników z tej grupy w środowisku pracy jest przestrzeganie ogólnych zasad bhp.

Grupa 2. zagrożenia obejmuje m.in. takie bakterie, jak: *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, odpowiedzialne często za

zakażenia układowe i skóry; *Candida albicans* wywołujący grzybice skóry i błon śluzowych; oraz wirus Polio powodujący chorobę Heinego-Medina.

Przykładem czynników z grupy 3. zagrożenia może być bakteria z rodzaju *Bacillus anthracis*, powodująca silnie zakaźną chorobę: wąglik, która może wystąpić w postaci skórnej, jelitowej i najcięższej – płucnej oraz *Mycobacterium tuberculosis* wywołująca gruźlicę – chorobę atakującą płuca oraz inne narządy. W grupie tej wyodrębniono grupę 3**, do której należą czynniki mogące stanowić ograniczone ryzyko zagrożenia dla ludzi, gdyż nie rozprzestrzeniają się drogą powietrzną, np. wirus wścieklizny, wirus kleszczowego zapalenia mózgu, wirusy zapalenia wątroby typu C.

Czynniki grupy 4. zagrożenia stanowią bardzo poważny problem, często kontakt z nimi grozi śmiercią. W grupie tej znajdują się wyłącznie wirusy, np. wirus Ebola wywołujący gorączkę krwotoczną – chorobę o śmiertelności 60-90% w zależności od szczepu wirusa, przejawiającą się zaburzeniami krzepnięcia krwi i krwotokami wewnętrznymi i zewnętrznymi.

Ponieważ dyrektywa 2000/54/WE jest jedynie bazą do opracowania dokumentów obowiązujących w poszczególnych krajach członkowskich UE, istnieją pewne rozbieżności co do wykazu szkodliwych czynników biologicznych w niej ujętych a wykazami załączonymi do dokumentów obowiązujących w poszczególnych krajach członkowskich UE. Obowiązujące w Polsce rozporządzenie MZ zawiera łącznie 389 wyszczególnionych czynników, tj. o 14 więcej niż uwzględniono w dyrektywie europejskiej (np. *Acinetobacter calcoaceticus*, *Alcaligenes faecalis*, *Bacillus subtilis*, *Cytophaga allerginae*, *Pantoea agglomerans*).

Należy zwrócić uwagę, że przedstawiony podział czynników biologicznych uwzględnia ich działanie na organizm zdrowego człowieka, natomiast nie bierze pod uwagę potencjalnego oddziaływania na pracowników z obniżoną sprawnością układu odpornościowego, np. kobiety w ciąży czy karmiące piersią. Dlatego trzeba pamiętać, że brak

danego czynnika w wykazie szkodliwych czynników nie oznacza, iż praca z nim jest bezpieczna i nie spowoduje negatywnych skutków zdrowotnych.

Ocena ryzyka powinna obejmować wszystkie czynniki biologiczne znajdujące się w środowisku pracy. W przypadku, gdy wyniki oceny ryzyka wskażą występowanie narażenia na czynniki biologiczne zaliczane do 1. grupy zagrożenia, pracodawca obowiązany jest do stosowania ogólnych zasad bezpieczeństwa i higieny pracy, określonych w odrębnych przepisach. W szczególności podstawowymi aktami prawnymi w tym obszarze są Kodeks pracy [2] oraz rozporządzenie MPiPS w sprawie ogólnych zasad bhp [9]. Dla pozostałych grup zagrożenia (od 2. do 4.) sposób postępowania określa dyrektywa/rozporządzenie MZ.

Pracodawca powinien wprowadzić takie procedury pracy, aby możliwe było uniknięcie zastosowania szkodliwego czynnika biologicznego poprzez jego zastąpienie innym czynnikiem biologicznym, który zgodnie z aktualną wiedzą nie jest niebezpieczny dla zdrowia lub jest mniej niebezpieczny. Jednakże w przypadku, gdy działania takie nie mogą być podjęte ryzyko narażenia pracowników musi być zminimalizowane do najniższego koniecznego poziomu. W tym celu należy:

- utrzymywać jak najniższą liczbę pracowników narażonych lub potencjalnie narażonych,
- zaprojektować przebieg pracy oraz środków nadzoru przemysłowego w taki sposób, aby uniknąć lub zminimalizować uwalnianie się czynników biologicznych w miejscu pracy,
- zapewnić pracownikom środki ochrony zbiorowej lub, gdy to nie jest możliwe, środki ochrony indywidualnej,
- dostarczyć pracownikom środki higieny w celu zminimalizowania przypadkowego przeniesienia lub uwolnienia czynnika biologicznego poza miejsce pracy,
- oznaczyć strefę zagrożenia znakiem ostrzegawczym,
- sporządzić plany postępowania na wypadek awarii z udziałem czynników biologicznych,

- wykonać badania ilościowe i jakościowe wszędzie tam, gdzie jest to konieczne i możliwe do wykonania z punktu widzenia technicznego, w celu potwierdzenia występowania czynników biologicznych poza zdefiniowaną strefą ich występowania,
- zapewnić odpowiednie warunki, w tym oznaczone pojemniki do składowania oraz usuwania odpadów biologicznych przez pracowników,
- opracować procedury bezpiecznego obchodzenia się z czynnikami biologicznymi również podczas ich transportu w obrębie miejsca pracy.

W dyrektywie/rozporządzeniu MZ określono obowiązki pracodawcy związane z zatrudnianiem pracowników w narażeniu na czynniki biologiczne. Pracodawca powinien na własny koszt podjąć wszystkie środki ostrożności w celu zapewnienia, że:

- pracownicy nie spożywają posiłków lub napojów w miejscach pracy, gdzie istnieje ryzyko skażenia czynnikami biologicznymi,
- pracownicy są wyposażeni w odpowiednią odzież ochronną i inne środki ochrony indywidualnej,
- pracownicy mają zapewnione odpowiednie pomieszczenia sanitarne z możliwością przepłukania oczu i odkażenia skóry,
- wszelkie wyposażenie ochronne jest prawidłowo przechowywane, sprawdzane, czyszczone i naprawiane,
- ustalone są procedury pobierania, obchodzenia się i przetwarzania probek pochodzenia ludzkiego lub zwierzęcego.

Dla pracowników narażonych na szkodliwe czynniki biologiczne, zatrudnionych w procesach przemysłowych lub w laboratoriach oraz pomieszczeniach dla zwierząt, określono szczególny sposób postępowania. W odniesieniu do tych grup zawodowych zdefiniowano tzw. środki hermetyczności, które należy podjąć w przypadku wystąpienia czynnika biologicznego zaliczanego do 2., 3. lub 4. grupy zagrożenia. Co do zasady oznaczenie stopni hermetyczności (2, 3, 4) odpowiada oznaczeniom grup zagrożenia.

Postanowienia prawne dotyczą także stosowania środków ochrony indywidualnej. Odzież robocza i środki ochrony indywidualnej, które mogą ulec skażeniu czynnikami biologicznymi, muszą być usuwane w chwili opuszczania przez pracownika miejsca pracy. Ponadto powinny być odkażane, jeśli jest to możliwe, lub skutecznie niszczone. Organizacja miejsca wymiany odzieży i pozostawienia środków ochrony indywidualnej oraz procedury z tym związane powinny uniemożliwiać kontakt tych środków z odzieżą prywatnego użytku.

W przypadku zatrudnienia pracowników w szczególnie niebezpiecznych warunkach związanych z możliwością wystąpienia awarii, konieczne jest zapewnienie pisemnych instrukcji, które zawierają wskazówki co do obchodzenia się z czynnikiem biologicznym, w szczególnosci, gdy należy on do 4. grupy zagrożenia. Istotnym elementem tego postępowania jest zapewnienie dwustronnej wymiany informacji pomiędzy pracownikiem i pracodawcą. Pracownicy niezwłocznie powinni powiadamiać o zdarzeniu, a pracodawcy o przyczynach wystąpienia awarii i środkach podjętych w celu opanowania zaistniałej sytuacji.

Pracownicy narażeni na oddziaływanie szkodliwych czynników biologicznych podlegają odpowiedniej kontroli zdrowotnej. Powinna być ona przeprowadzona przed przystąpieniem pracownika do pracy i regularnie powtarzana. W uzasadnionych przypadkach pracownicy mogą być poddani szczepieniom ochronnym, przy czym szczepienia powinny być przeprowadzone zgodnie z przepisami krajowymi. Pracowników należy poinformować o korzyściach i zagrożeniach związanych z podjęciem decyzji o zaszczepieniu bądź rezygnacji ze szczepień. Powinny być one wykonane nieodpłatnie. W przypadku stwierdzenia u pracowników pracujących w narażeniu na czynniki biologiczne choroby, która może być wynikiem zakażenia, dokonuje się analizy przypadku i z reguły decyduje o przeprowadzeniu badania u innych narażonych osób. Może to skutkować zmianami w ocenie ryzyka zawodowego.

Dyrektywa/rozporządzenie MZ nakładają także szereg obowiązków związanych z dokumentowaniem oceny ryzyka oraz wyników analizy

stanu zdrowia pracowników. Ma to ogromne znaczenie przy rozpatrywaniu zagrożeń wynikających z obecności czynników biologicznych, w przypadku których istnieją liczne trudności w ustaleniu, czy chorobę można sklasyfikować jako chorobę zawodową. Wynika to faktu, że trudno jest oddzielić środowisko pracy od środowiska naturalnego, gdzie mogą występować podobne patogenne szczepy drobnoustrojów.

3.2. Zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom stosującym środki ochrony indywidualnej

Sprzęt ochrony układu oddechowego przed bioaerozolem jest zaliczany do środków ochrony indywidualnej (ŚOI), które stosuje się, gdy nie ma możliwości zapobiegania ryzyku zawodowemu przez eliminację zagrożeń u źródła lub ich minimalizację w wyniku zastosowania rozwiązań organizacyjnych lub technicznych środków ochrony zbiorowej. Należy bezwzględnie stosować zasadę, że ŚOI powinny być traktowane przez pracodawców jako rozwiązanie ostateczne, gdyż nie zapewniają one eliminacji ryzyka wynikającego z narażenia pracowników na wdychanie szkodliwych bioaerozoli, a jedynie zmniejszają prawdopodobieństwo wystąpienia skutków narażenia. Skuteczność ochrony pracowników warunkuje prawidłowy dobór rodzaju i klasy ochronnej sprzętu oraz opracowanie i wdrożenie przez kierownictwo zasad jego prawidłowego stosowania. W praktyce jednak często pracownicy nie stosują sprzętu lub nie jest on dostępny na stanowiskach pracy. W przypadku pracowników przyczyną może być niski poziom wiedzy na temat ryzyka zawodowego na stanowisku pracy oraz konsekwencji niestosowania sprzętu, a także postrzeganie tych środków ochrony jako niekomfortowych. W drugim przypadku najczęściej jest to brak wiedzy pracodawcy dotyczącej zagrożeń i skutecznych środków prewencji oraz względy ekonomiczne.

W Polsce podstawowym aktem prawnym regulującym postanowienia dotyczące stosowania środków ochrony indywidualnej jest Kodeks

pracy [2]. Zgodnie z art. 237^6 p. 1 pracodawca jest zobowiązany dostarczyć pracownikowi nieodpłatnie ŚOI zabezpieczające przed działaniem niebezpiecznych i szkodliwych dla zdrowia czynników występujących w środowisku pracy oraz informować go o sposobach posługiwania się tymi środkami. W myśl p. 3 tego samego artykułu Kp, środki ochrony indywidualnej dostarczane przez pracodawcę powinny spełniać wymagania dotyczące oceny zgodności określone w odrębnych przepisach. W praktyce dla pracodawcy i użytkownika oznacza to, że powinny być one oznaczone znakiem CE i posiadać instrukcję producenta.

Szczegółowe regulacje prawne dotyczące zasad bezpiecznego stosowania ŚOI są określone w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Socjalnej (MPiPS) w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy [9]. Zapisy zawarte w załączniku II tego rozporządzenia są zgodne z postanowieniami dyrektywy Rady nr 89/656/EWG z dnia 30 listopada 1989 r. w sprawie minimalnych wymagań w dziedzinie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników korzystających z wyposażenia ochronnego [4].

Przed podjęciem decyzji o konieczności używania przez pracowników sprzętu ochrony układu oddechowego przed bioaerozolem pracodawca powinien rozważyć m.in. następujące możliwości:

- zastosowanie technicznych środków do monitorowania czynników biologicznych,
- zmianę procedur pracy w kierunku zminimalizowania kontaktu z nośnikami czynników biologicznych (możliwa zmiana organizacji pracy lub zastosowanie ochron zbiorowych),
- izolację stref, w których występują zagrożenia szkodliwymi czynnikami biologicznymi.

Często, ograniczając ryzyko zawodowe związane z występowaniem czynników biologicznych w środowisku pracy, stosuje się zasadę „STOP”. Skrót ten pochodzi z języka angielskiego i oznacza S

(*Substitution*) – T (*Technical safety*) – O (*Organisation*) – P (*Personal safety*). Zasada ta określa następującą sekwencję postępowania: zastąpienie – bezpieczeństwo techniczne – środki organizacyjne – środki ochrony indywidualnej.

Obowiązki związane z zapewnieniem ŚOI spoczywają na pracodawcy. Przede wszystkim dotyczą one:

- nieodpłatnego dostarczania pracownikom,
- właściwego doboru do zagrożeń,
- określenia warunków używania,
- organizowania szkoleń,
- zapewnienia odpowiedniego sposobu przechowywania, czyszczenia, dezynfekcji, konserwacji oraz dokonywania niezbędnych napraw.

Wśród wymienionych obowiązków pracodawcy najistotniejszy jest prawidłowy wybór sprzętu ochrony układu oddechowego spośród oferty rynkowej. Sprzęt powinien:

- spełniać zasadnicze wymagania dotyczące projektowania i wytwarzania w odniesieniu do bezpieczeństwa i ochrony zdrowia,
- być odpowiedni do istniejącego zagrożenia,
- nie powodować sam z siebie zwiększenia zagrożenia,
- być odpowiedni do warunków panujących na danym stanowisku pracy,
- odpowiadać wymaganiom ergonomicznym i uwzględniać stan zdrowia pracownika,
- być dopasowany do użytkownika po niezbędnym wyregulowaniu.

Jednocześnie na pracownikach stosujących sprzęt ochrony układu oddechowego w środowisku pracy spoczywa wiele obowiązków związanych z przestrzeganiem zasad jego bezpiecznego użycia. Przede wszystkim pracownicy powinni bezwzględnie zakładać sprzęt zgodnie z instrukcją producenta i wskazówkami przekazanymi przez pracodawcę podczas szkoleń oraz wykonywać wszystkie czynności zawodowe w przydzielonym im sprzęcie. Podczas przerw w pra-

cy konieczne jest przechowywanie sprzętu w wyznaczonym do tego celu miejscu, a następnie przestrzeganie zasad higieny podczas jego ponownego zakładania i dopasowywania. Istotnym obowiązkiem pracownika jest także dbanie o dobry stan techniczny przydzielonego sprzętu i niezwłoczne zgłaszanie przełożonemu uszkodzeń lub wystąpienia znacznych utrudnień w pracy związanych z jego stosowaniem.

3.3. Ocena zgodności środków ochrony indywidualnej

Przed wprowadzeniem do obrotu na rynek UE sprzęt ochrony układu oddechowego jako środek ochrony indywidualnej powinien być poddany odpowiedniej procedurze oceny zgodności, potwierdzającej spełnienie postanowień rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG. Rozporządzenie weszło w życie 20 kwietnia 2016 r., przy czym jest ono stosowane od 21 kwietnia 2018 r. Rozporządzenie ustanawia wymagania w zakresie projektowania i produkcji ŚOI, które mają być udostępniane na rynku, w celu zapewnienia ochrony zdrowia i bezpieczeństwa użytkowników, a także ustanowienia zasad dotyczących swobodnego przepływu ŚOI na terenie UE. Obejmuje ono ŚOI, które przed wprowadzeniem do obrotu nie były jeszcze stosowane na rynku UE (nowe ŚOI wytworzone przez producenta mającego siedzibę w UE albo ŚOI, niezależnie od tego, czy nowe, czy używane, importowane z kraju trzeciego). Ma także zastosowanie do wszystkich sposobów dostawy, w tym sprzedaży na odległość.

Na producencie ŚOI w ogólnym zarysie ciąży odpowiedzialność za:

- zaprojektowanie i wytworzenie ŚOI zgodnie z mającymi zastosowanie zasadniczymi wymaganiami dotyczącymi zdrowia i bezpieczeństwa określonymi w rozporządzeniu,

- sporządzenie dokumentacji technicznej oraz przeprowadzenie lub zlecenie przeprowadzenia odpowiedniej procedury oceny zgodności,
- sporządzenie deklaracji zgodności UE i umieszczenie oznakowania CE w przypadku wykazania zgodności ŚOI z mającymi zastosowanie zasadniczymi wymaganiami dotyczącymi zdrowia i bezpieczeństwa w drodze odpowiedniej procedury,
- przechowywanie dokumentacji technicznej oraz deklaracji zgodności UE przez 10 lat po wprowadzeniu ŚOI do obrotu,
- zapewnienie, aby wprowadzane do obrotu ŚOI były opatrzone nazwą typu, numerem partii lub serii lub inną informacją umożliwiającą ich identyfikację; a w przypadku, gdy nie pozwala na to wielkość lub charakter ŚOI zapewnienie, aby wymagane informacje były umieszczone na opakowaniu lub w dokumencie towarzyszącym ŚOI,
- umieszczenie na ŚOI, a jeżeli nie jest to możliwe na ich opakowaniu lub w dokumencie towarzyszącym (instrukcji producenta) swojej nazwy, zarejestrowanej nazwy handlowej lub zarejestrowanego znaku towarowego oraz adresu pocztowego, pod którym można się z nimi skontaktować,
- dołączenie do ŚOI instrukcji oraz informacji określonych w rozporządzeniu w języku łatwo zrozumiałym dla konsumentów i innych użytkowników końcowych, określonym przez dane państwo członkowskie; takie instrukcje i informacje, a także wszelkie etykiety muszą być jasne, zrozumiałe i czytelne,
- przekazanie, na uzasadnione żądanie właściwego organu krajowego, wszelkich informacji i dokumentacji (w formie papierowej lub elektronicznej) niezbędnych do wykazania zgodności ŚOI z rozporządzeniem, w języku łatwo zrozumiałym dla tego organu; na żądanie tego organu współpracowanie z nim w działaniach podjętych w celu usunięcia zagrożeń, jakie stwarzają ŚOI wprowadzone przez producenta do obrotu.

Zgodnie z rozporządzeniem ŚOI są klasyfikowane według kategorii zagrożeń, przed którymi mają chronić użytkowników. Według tej klasyfikacji sprzęt ochrony układu oddechowego, którego przeznaczeniem jest ochrona człowieka przed czynnikami biologicznymi, zaliczany jest do kategorii III. Oznacza to, że sprzęt powinien zapewnić ochronę przez zagrożeniami, które mogą mieć poważne konsekwencje, takie jak śmierć lub nieodwracalne szkody na zdrowiu. Dlatego producenci tego typu sprzętu powinni dołożyć wszelkich starań co do jego jakości i zapewnić wszelkie pomocne dla użytkownika informacje związane z bezpiecznym jego stosowaniem.

Przed wprowadzeniem do obrotu producent ŚOI kategorii III musi przedstawić egzemplarz wzoru do badania typu UE, a także dokonać wyboru jednego z dwóch modułów potwierdzających zgodność z typem: na podstawie wewnętrznej kontroli produkcji oraz nadzorowanych kontroli produktów w losowych odstępach czasu (moduł C2) lub na podstawie zapewnienia jakości procesu produkcji (moduł D). W ramach procedury opisanej w module C2 producent podejmuje wszelkie działania w celu zapewnienia jednorodności procesu wytwarzania ŚOI oraz ich zgodności z typem opisanym w certyfikacie badania typu UE i wymaganiami rozporządzenia. Jednostka notyfikowana wybrana przez producenta przeprowadza kontrole produktu w celu weryfikacji podjętych przez producenta działań. Z kolei w ramach modułu D producent stosuje zatwierdzony system jakości w odniesieniu do produkcji oraz kontroli produktu finalnego, a także prowadzi badania ŚOI oraz podlega nadzorowi jednostki notyfikowanej, która przeprowadza okresowe audyty.

Ważnym obowiązkiem producenta jest przygotowanie informacji dla użytkownika. W załączniku II rozporządzenia UE 2016/425, ust. 1, pkt. 1.4. określono, że instrukcja/informacja producenta powinna zawierać (poza nazwą i adresem producenta) dane dotyczące:

a) sposobu przechowywania, użytkowania, czyszczenia, konserwacji, obsługi i dezynfekowania; zalecane przez producenta środki

czyszczące, konserwujące i dezynfekujące nie mogą niekorzystnie wpływać na ŚOI ani na użytkownika, gdy są stosowane zgodnie z odpowiednimi instrukcjami,

b) skuteczności działania ŚOI, stwierdzonej podczas odpowiednich badań technicznych sprawdzających poziom lub klasę ochrony,
c) w stosownych przypadkach, wyposażenia, które można stosować z ŚOI, oraz charakterystyki odpowiednich części zamiennych,
d) w stosownych przypadkach, klas ochrony dostosowanych do różnych poziomów zagrożeń i związanych z tym ograniczeń użytkowania,
e) w stosownych przypadkach, miesiąca oraz roku ważności lub okresu przydatności ŚOI lub niektórych ich części składowych,
f) w stosownych przypadkach, rodzaju opakowania odpowiedniego do transportu,
g) znaczenia wszelkich oznaczeń,
h) zagrożeń, przed którymi ŚOI mają chronić,
i) odesłania do rozporządzenia nr 2016/425/UE oraz, w stosownych przypadkach, do innych przepisów unijnego prawodawstwa,
j) nazwy, adresu i numeru identyfikacyjnego jednostki lub jednostek notyfikowanych uczestniczących w ocenie zgodności ŚOI,
k) odniesień do odpowiednich zastosowanych norm zharmonizowanych, łącznie z datą przyjęcia norm(y) lub odniesień do innych zastosowanych specyfikacji technicznych,
l) adresu strony internetowej, na której można uzyskać dostęp do deklaracji zgodności UE.

Informacji, o których mowa w pkt. i), j), k), i l), nie trzeba umieszczać w instrukcjach dostarczonych przez producenta, jeżeli ŚOI towarzyszy deklaracja zgodności UE. Należy podkreślić szczególną rolę informacji producenta, która powinna być w miarę potrzeby uszczegółowiona o zapisy związane z bezpiecznym stosowaniem sprzętu. Jest to związane przede wszystkim z faktem, że tylko prawidłowo dobrany i użytkowany sprzęt może w pełni zapewnić odpowiedni do poziomu ryzyka stopień ochrony.

Piśmiennictwo

1. Dyrektywa Rady 89/391/EWG z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy; OJ L 183, 29.6.1989, p. 1-8.
2. Kodeks Pracy – Ustawa z dnia 26 czerwca 1974, Dz. U. 2014.1502 t.j. z późniejszymi zmianami.
3. Dyrektywa 2000/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej z dn. 18 września 2000 r. w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy, Bruksela: OJ 262/21.
4. Dyrektywa Rady nr 89/656/EWG z dnia 30 listopada 1989 r. w sprawie minimalnych wymagań w dziedzinie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników korzystających z wyposażenia ochronnego; (trzecia dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG), Dz. U. L 393 , 30/12/1989 p. 0018-0028.
5. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2016/425/UE z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG, Dz. U. UE L 81/51.
6. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych, zmiany dyrektywy 2001/83/WE, rozporządzenia (WE) nr 178/2002 i rozporządzenia (WE) nr 1223/2009 oraz uchylenia dyrektyw Rady 90/385/EWG i 93/42/EWG; OJ L 117, 5.5.2017, p. 1-175.
7. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r., Dz. U. 2005 Nr 81 poz. 716 z późniejszymi zmianami, Dz. U. 2008 Nr 48 poz. 288.
8. Dutkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L., Szymańska J. Biologiczne czynniki zagrożenia zawodowego. Klasyfikacja, narażone grupy zawodowe, pomiary, profilaktyka. Ad punctum, Lublin 2018.
9. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. , Dz. U. z 2003 r. , Nr 169, poz. 1650 ze zmianami oraz z 2001 r. Nr 173, poz. 1034.

4. Dobór sprzętu ochrony układu oddechowego do zagrożeń biologicznych

Niezbędnym elementem procedury doboru sprzętu ochrony układu oddechowego dla pracowników zatrudnionych w narażeniu na szkodliwy bioaerozol jest ocena ryzyka. Powinna ona być wykonana dla każdego stanowiska pracy, a nawet należy rozważyć możliwość oceny zagrożeń w odniesieniu do poszczególnych czynności pracownika. Ze względu na brak normatywów higienicznych (wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń; NDS) w odniesieniu do czynników biologicznych konieczne jest zastosowanie do oceny ryzyka zawodowego postanowień rozporządzenia MZ [1]. Pomocne mogą być także zapisy zawarte w załączniku 4 i 5 do tego rozporządzenia dotyczące przypisania do czynności wykonywanych przez pracowników odpowiednich stopni hermetyczności, ściśle powiązanych ze środkami zapobiegającymi lub redukującymi przypadkowe przeniesienie lub uwolnienie czynnika biologicznego poza miejsce pracy.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami pracodawca ma obowiązek przeprowadzenia oceny ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na czynniki biologiczne, ale nie ma obowiązku wykonywania pomiarów środowiska pracy w kierunku identyfikacji ich obecności. Ocena ryzyka może być przeprowadzona wyłącznie na podstawie danych literaturowych. Jednakże w przypadku, gdy pracodawca podejrzewa, że określona grupa pracowników jest narażona na działanie czynników biologicznych mogących powodować objawy chorobowe lub objawy te już wystąpiły, może zaistnieć konieczność wykonania badań laboratoryjnych w kierunku identyfikacji danego czynnika biologicznego. Wyniki analiz mikrobiologicznych próbek powietrza i wymazów z powierzchni mogą być wyrażone ilościowo i jakościowo. Do parametrów mikrobiologicznych zalicza się między innymi ogólną liczbę bakterii w temperaturze 30 ^{o}C, liczbę grzybów (pleśni i drożdży), liczbę promieniowców, w tym termofilnych, oraz identyfikację gatunkową bakterii i grzybów.

Badania i pomiary biologicznych czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy pracodawcy powinni wykonywać przede wszystkim w laboratoriach, które uzyskały w tym zakresie akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (PCA). W przypadku braku laboratoriów akredytowanych do badania lub pomiarów określonego czynnika biologicznego, badania te mogą być wykonane w innych laboratoriach, lecz takich, które dysponują odpowiednią aparaturą badawczo-pomiarową, stosują powszechnie uznane i zwalidowane metody badań oraz prowadzą udokumentowany nadzór metrologiczny nad przyrządami. Merytoryczne wsparcie dla pracodawców w rozwiązywaniu problemów dotyczących zawodowej ekspozycji na czynniki biologiczne zapewniają: Krajowy Punkt Informacyjny ds. Czynników Biologicznych oraz Krajowy Rejestr Czynników Biologicznych w Miejscu Pracy, działające w Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi.

Pomocnym narzędziem dla pracowników, pracodawców oraz specjalistów zarządzających bezpieczeństwem i higieną pracy w przedsiębiorstwie, wspomagającym zadania związane z oceną narażenia i ryzyka zawodowego spowodowanego występowaniem czynników biologicznych może być również opracowana w CIOP-PIB baza wiedzy o czynnikach biologicznych BIOINFO.

Prawidłowo przeprowadzona ocena ryzyka zawodowego powinna dostarczyć pracodawcy danych co do wyboru typu i klasy ochronnej sprzętu. W kontekście wypełnienia przez pracodawców zobowiązania dotyczącego prawidłowego doboru sprzętu ochrony układu oddechowego do zagrożeń biologicznych należy podkreślić aspekt doboru sprzętu do warunków panujących na stanowisku pracy, w szczególności związanych z mikroklimatem gorącym i wilgotnym.

4.1. Identyfikacja zagrożeń i ocena ryzyka zawodowego

Specyfika czynników biologicznych polega na tym, że nie ma stałej zależności między ich stężeniem i czasem kontaktu a odpowiedzią organizmu na ich szkodliwe działanie. Należy także podkreślić ciągłą zmienność procesów życiowych mikroorganizmów w czasie ekspozycji pracowników na te czynniki w środowisku pracy. Dlatego też nie ma ustalonych jednolitych normatywów higienicznych dotyczących dopuszczalnych stężeń czynników biologicznych w środowisku pracy, jak również wartości progowych narażenia [2]. W konsekwencji ocena ryzyka zawodowego narażenia pracowników na czynniki biologiczne jest jakościowa [3]. Pracodawca powinien więc zgromadzić informacje dotyczące szkodliwych czynników biologicznych występujących na stanowiskach pracy, biorąc pod uwagę:

- klasyfikację i wykaz szkodliwych czynników biologicznych zawarty w rozporządzeniu MZ,
- rodzaj czynności zawodowych wykonywanych przez pracownika oraz czas i stopień narażenia na działanie czynników biologicznych,
- możliwość (prawdopodobieństwo) działania alergizującego lub toksycznego szkodliwego czynnika biologicznego,
- rodzaj choroby, która może wystąpić u pracownika w następstwie wykonywanej pracy,
- analizy stwierdzonych przypadków wystąpienia chorób zawodowych, które miały bezpośredni związek z pracą wykonywaną przez pracowników zatrudnionych w warunkach narażenia na czynniki biologiczne,
- zalecenia organów właściwej inspekcji sanitarnej, jednostek służby medycyny pracy lub Państwowej Inspekcji Pracy (PIP).

Pierwszym krokiem przy ocenie ryzyka narażenia pracowników na szkodliwe czynniki biologiczne jest ich identyfikacja tych czynników.

Należy się przy tym kierować definicją zawartą w rozporządzeniu MZ. Następnie każdy ze zidentyfikowanych czynników należy zaklasyfikować do jednej z czterech grup zagrożenia w zależności od ich zdolności do wywoływania choroby.

W charakterystyce szkodliwych bioaerozoli ważne jest także ich źródło pochodzenia. Mogą one pochodzić z wewnątrz organizmów ludzkich, zwierzęcych i roślinnych lub znajdować się w glebie, wodzie, ściekach, odpadach, nawozie, ściółce, na składowanych surowcach roślinnych i zwierzęcych, na powierzchni budynków i różnych przedmiotów, w olejach, drewnie, a także w pyle i w powietrzu. Na przykład w środowisku silnie zanieczyszczonym bioaerozolem pochodzącym ze zboża czy kompostu stężenie mikroorganizmów w powietrzu może osiągać wartości rzędu milionów lub nawet miliardów jednostek tworzących kolonie w jednostce objętości [4]. Pochodzenie szkodliwych czynników biologicznych ma bezpośrednie przełożenie na dobór i sposób użytkowania sprzętu ochrony układu oddechowego.

Charakteryzując czynniki biologiczne, należy także wziąć pod uwagę fakt, że mikroorganizmy przenoszone drogą powietrzną mogą wnikać do ustroju człowieka nie tylko przez układ oddechowy, lecz także przez spojówki, nabłonek jamy nosowo-gardłowej i skórę. W takim przypadku pracodawca powinien przewidzieć oprócz sprzętu ochrony układu oddechowego także środki ochrony oczu i twarzy lub zastosować ochronę zintegrowaną.

Kolejnym kryterium oceny ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na czynniki biologiczne jest rodzaj wykonywanych przez pracownika czynności zawodowych.

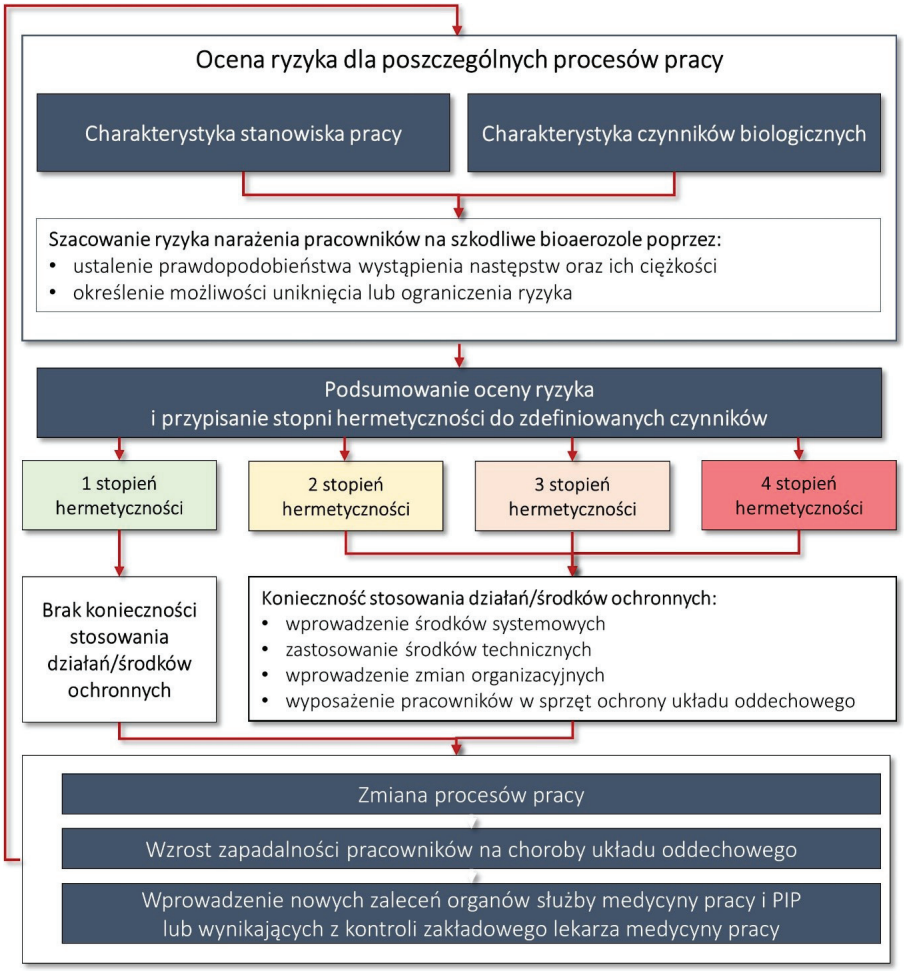
Pracownik może wykonywać czynności zamierzone, bezpośrednio związane z jednym lub kilkoma czynnikami biologicznymi. Wtedy jego narażenie jest w wystarczającym stopniu znane i można precyzyjnie określić klasę ochrony potrzebnego sprzętu. Narażenie na czynniki biologiczne może jednak wystąpić także podczas wykonywania czynności niezamierzonych, niezwiązanych bezpośrednio ze stosowaniem

tych czynników w procesie pracy. Z reguły pierwszy typ czynności jest charakterystyczny dla środowiska przemysłowego (przemysł biotechnologiczny, farmaceutyczny, kosmetyczny, przerób biomasy), a drugi występuje w zakładach opieki zdrowotnej i sortowniach odpadów.

Czynności zawodowe pracowników powinny być także rozpatrywane pod kątem ich charakteru i ekspozycji wynikającej z czasu narażenia. W tym kontekście najbardziej niebezpieczne dla pracowników są czynności, którym towarzyszy wytwarzanie bioareozolu o dużej dawce infekcyjnej [5-13]. Wówczas narażeni są wszyscy pracownicy przebywający w strefie pracy, nie tylko ci wykonujący określone czynności z biologicznym czynnikiem szkodliwym – inaczej niż wtedy, kiedy czynnik infekcyjny przenosi się jedynie przez bezpośredni kontakt.

W ocenie ryzyka związanego z występowaniem szkodliwych czynników biologicznych w środowisku pracy istotna jest także analiza przypadków wystąpienia zachorowań oraz dostępność metod profilaktyki zawodowej.

Przykładowe elementy oceny ryzyka z ukierunkowaniem na etapy podejmowania decyzji o zasadności stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego przed szkodliwym bioarozolem przedstawiono na rys. 4.1.



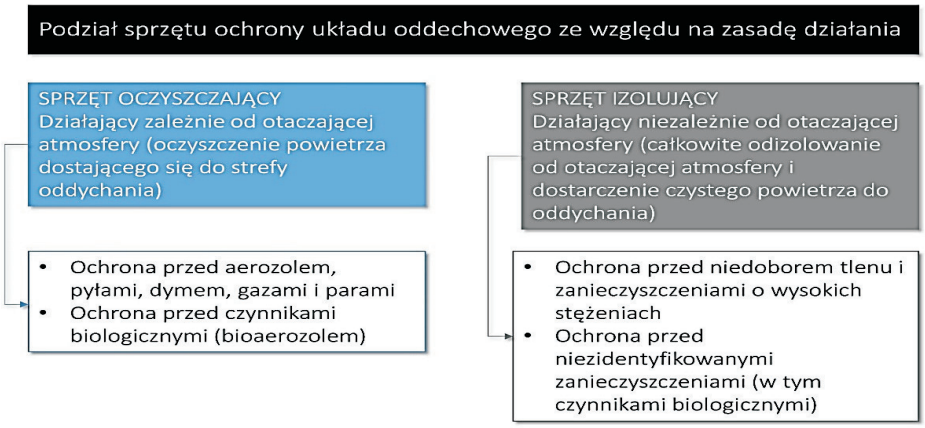
Rys. 4.1. Elementy oceny ryzyka przy doborze sprzętu ochrony układu oddechowego (źródło: własne CIOP-PIB)

4.2. Dobór sprzętu

Sprzęt ochrony układu oddechowego zabezpiecza organizm przed wchłanianiem z atmosfery substancji niebezpiecznych i szkodliwych, stanowiących grupę czynników wysokiego ryzyka. Chroni przed zagrożeniami, które mogą spowodować poważne i nieodwracalne uszko-

dzenia zdrowia, a także utratę życia. Dlatego tak istotne jest dobranie sprzętu zarówno o właściwym zakresie ochrony, jak i optymalnej skuteczności.

Ogólny schemat podziału sprzętu ochrony układu oddechowego wg zasady działania przedstawia rys. 4.2.



Rys. 4.2. Ogólny podział sprzętu ochrony układu oddechowego wg zasady działania (źródło: własne CIOP-PIB)

Podstawowym typem sprzętu ochrony układu oddechowego przed aerozolem jest sprzęt filtrujący. Może on występować w wersji bez dodatkowego wspomagania przepływu powietrza, w postaci filtrów i półmasek filtrujących, a także w wersji ze wspomaganiem lub wymuszonym przepływem powietrza przez układ filtrów. Jednakże w każdym z wymienionych typów podstawowym elementem, zapewniającym oczyszczanie powietrza oddechowego, jest włóknina filtracyjna, o odpowiedniej charakterystyce. W zależności od skuteczności filtracji, czyli ilości cząstek (w tym także mikroorganizmów) wychwytywanych ze strugi powietrza w odniesieniu do ilości napływających cząstek, sprzęt filtrujący zaliczany jest do jednej z trzech klas: 1, 2, 3. Klasyfikacja ta jest niezależna od rozwiązania konstrukcyjnego (filtr czy półmaska filtrująca), a użytkownik jest o niej

informowany w postaci odpowiedniego znakowania. W przypadku filtrów znakowanie obejmuje klasy ochrony P1, P2 i P3, natomiast wśród półmasek filtrujących wyróżnia się klasy FFP1, FFP2 oraz FFP3. Symbol 1 oznacza sprzęt o niskiej skuteczności, 2 – średniej, a 3 – najwyższej. Najwyższy, 3 poziom ochrony oznacza praktycznie, że materiał półmaski filtrującej zatrzymuje 99% cząstek aerozolu ze strumienia powierza przechodzącego przez materiał w fazie wdechu. Oprócz symbolu wskazującego na klasę ochronną, na filtrach i półmaskach filtrujących pojawia się symbol R – wielokrotnego użycia lub NR – jednokrotnego użycia. Filtry i półmaski filtrujące powinny spełniać odpowiednio wymagania norm: EN 143:2000/A1:2006 [14] i EN 149:2001+A1:2009 [15].

Przy doborze klasy ochronnej sprzętu ważna jest wielkość cząstek bioaerozolu. Zależy ona przede wszystkim od gatunku mikroorganizmu i może mieścić się w zakresie 0,01 – 100 μm. Wyodrębniono cztery następujące fazy bioaerozolu, biorąc pod uwagę charakterystykę epidemiologiczną:

- gruboziarnistą: średnica kropel > 100 μm,
- drobnoziarnistą: cząstki < 100 – 50 μm,
- kropelkowo-jądrową: cząstki < 50 – 1 μm,
- pyłu (ultradrobiny): 50 – 0,2 μm.

Faza gruboziarnista szybko osiada i rozprzestrzenia się w niewielkiej odległości od źródła mikroorganizmów. Faza drobnoziarnista zawiera drobniutkie kropelki, z których szybko, na skutek wyparowania, tworzą się jądra kropelkowe, które mogą przez dłuższy czas znajdować się w powietrzu w stanie zawieszonym i rozprzestrzeniać się za pośrednictwem prądów powietrznych na znaczną odległość. Faza kropelkowo-jądrowa, ze względu na długi czas przebywania cząstek tej fazy w powietrzu i ich zdolność rozprzestrzeniania się drogą powietrzną na znaczne odległości, ma szczególne znaczenie epidemiologiczne. Faza pyłu formuje się najczęściej w procesach przemysłowych, a także na skutek wysychania zakażonych kropel śluzu lub śliny na cząstkach pyłu.

Wobec braku udokumentowanych wartości NDS bioaerozoli nie jest możliwe stosowanie standardowej metody doboru sprzętu filtrującego, polegającej na doborze klasy ochronnej do krotności przekroczenia dopuszczalnej wartości stężenia aerozolu. Z tego powodu opracowano następujące wytyczne doboru klasy ochronnej półmasek filtrujących i filtrów stosowanych do ochrony przed bioaerozolem w zależności od wielkości cząstek i charakterystyki czynników biologicznych:

- bioaerozol, którego cząstki mają wielkość powyżej 1 μm i zaliczany jest do 2. grupy zagrożenia – półmaski i filtry o niskiej skuteczności – klasa FFP1/P1,
- bioaerozol, którego wielkość cząstek zawiera się w przedziale < 1 μm, 0,5 μm ≥ i zaliczany jest do 2. lub 3. grupy zagrożenia – półmaski i filtry o średniej skuteczności – klasa FFP2/P2,
- bioaerozol, którego wielkość cząstek zawiera się w przedziale < 0,5 μm, 0,3μm ≥ i zaliczany jest do 3. grupy zagrożenia – sprzęt wysokoskuteczny – klasa FFP3/P3.

Dodatkowo, gdy powinna być zapewniona ochrona przed krwią lub innymi płynami fizjologicznymi, należy stosować sprzęt o potwierdzonej skuteczności ochronnej wobec krwi i innych płynów fizjologicznych. Informacji na ten temat należy szukać w instrukcji użytkowania dostarczanej przez producenta.

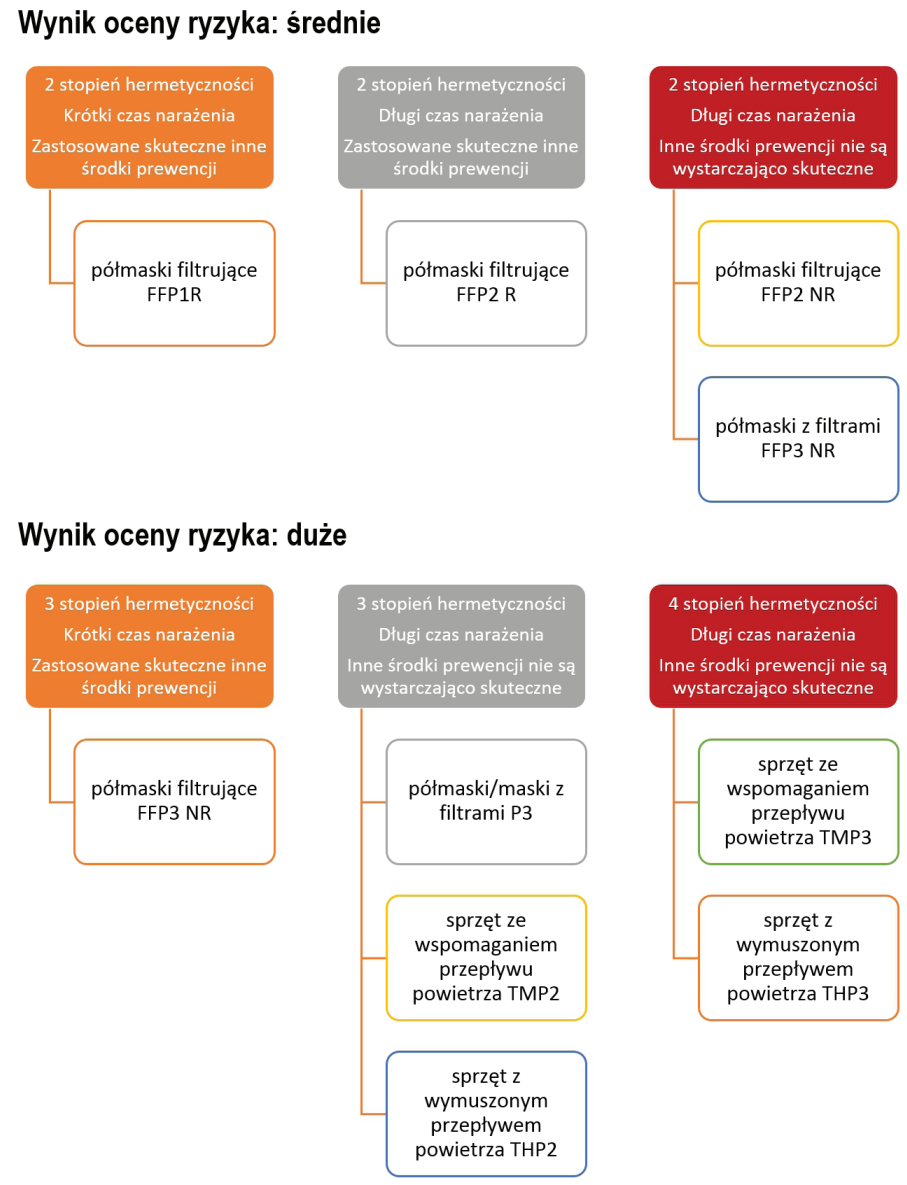
W wypadku czynników biologicznych 4. grupy zagrożenia zawodowego konieczne jest stosowanie sprzętu specjalistycznego z dodatkowym źródłem zasilania, np. sprzętu ze wspomaganiem lub wymuszonym przepływem powietrza lub typu izolującego drogi oddechowe, np. sprzętu wężowego podłączonego do linii sprężonego powietrza lub aparatów powietrznych butlowch.

Wprowadzenie do sprzętu filtrującego dodatkowego wspomagania przepływu powietrza, uzyskanego na skutek wmontowania dmuchawy w obieg powietrza oddechowego, rozszerza możliwości stosowania lekkich kapturów z dużymi, przeźroczystymi wizjerami. Taki

sprzęt zapewnia jednoczesną ochronę układu oddechowego oraz oczu i twarzy pracownika. Podział na sprzęt ze wspomaganiem przepływu i z wymuszonym przepływem powietrza wynika bezpośrednio ze skuteczności ochrony zapewnianej przez odpowiednio skompletowaną część twarzową. W przypadku sprzętu ze wspomaganiem przepływu powietrza jest stosowana maska lub półmaska, których konstrukcja zapewnia skuteczne działanie także bez włączonego nawiewu i wtedy skuteczność takiej ochrony jest na poziomie sprzętu bez wspomagania. Umożliwia to zmienne w czasie regulowanie stopnia skuteczności, co na stanowiskach pracy, na których występuje czasowe nasilenie zanieczyszczenia, jest najlepszym rozwiązaniem.

Godne polecenia jest także stosowanie tego typu rozwiązań podczas prac w zanieczyszczonej atmosferze połączonej z uciążliwymi warunkami klimatycznymi, gdyż czasowe włączenie nawiewu powoduje poprawę komfortu oddychania. Sprzęt filtrujący z wymuszonym przepływem powietrza, ze względu na rodzaj stosowanej części twarzowej, można jedynie użytkować z włączonym zasilaniem dmuchawy. Luźno dopasowany kaptur wymaga dodatkowego rozwiązania zapewniającego, że cząstki zanieczyszczeń nie dostaną się do strefy oddychania. Warunek ten jest spełniony przez wytwarzanie nadciśnienia pod częścią twarzową, które uniemożliwia zasysanie zanieczyszczeń z otoczenia. Sprzęt ze wspomaganiem przepływu powietrza i z przepływem wymuszonym powinien spełniać odpowiednio wymagania norm: EN 12942:1998/A1:2002/A2:2008 [16] oraz EN 12941:1998/A1:2002/A2:2008 [17].

Wybór klasy ochrony sprzętu jest podstawowym etapem doboru środków ochrony układu oddechowego, jednakże nie wystarcza do podjęcia ostatecznej decyzji. Dopiero dokonanie wyboru rozwiązania konstrukcyjnego, a nawet ustalenie czasu stosowania ŚOI i ich bezkolizyjności w stosunku do innych środków ochrony (np. gogli, okularów) pozwala uznać proces doboru za zakończony. Rekomendacje dotyczące doboru rodzaju sprzętu i jego klasy ochronnej w zależności od poziomu ryzyka zawodowego przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Wskazówki dotyczące doboru rodzaju i klasy ochronnej sprzętu ochrony układu oddechowego przed bioaerozolem (źródło: własne CIOP-PIB)

Doboru rozwiązania konstrukcyjnego sprzętu i jego klasy ochronnej należy dokonać na podstawie przyporządkowania czynności, jakie wykonuje pracownik w narażeniu na czynniki biologiczne, do stopni

hermetyczności według dyrektywy 2000/54/WE i rozporządzenia MZ. Jako przykład można podać możliwy sposób postępowania podczas oceny ryzyka przeprowadzonej dla pracownika sortowni odpadów organicznych, którego kontakt z czynnikami biologicznymi jest niezamierzony, ale może dotyczyć czynników biologicznych zaliczanych do 3. grupy zagrożenia , np. WZWB. Nie są to jednak czynniki przenoszone drogą powietrzną, a ponadto ich przeżywalność w środowisku jest niewielka. Zatem, mimo iż są to czynniki biologiczne wysoce infekcyjne dla innej grupy zawodowej (np. chirurgów, pracowników laboratoriów diagnostycznych), w wypadku pracowników sortowni prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia zagrażającego ich zdrowiu jest małe. Gdyby to był jedyny czynnik biologiczny, ryzyko oceniono by jako małe, a stopień hermetyczności jako 2.

Jednakże dla grupy pracowników sortowni większe zagrożenie wynika z ich narażenia na wdychanie bioaerozolu zawierającego grzyby pleśniowe i endotoksyny pochodzenia bakteryjnego, które w zależności od rodzaju mogą należeć do różnych grup zagrożenia i od tego zależeć powinien wymagany stopień hermetyczności. Trzeba podkreślić, że w przypadku czynności zawodowych, podczas których pracownik ma kontakt z kilkoma czynnikami, o stopniu hermetyczności decyduje czynnik należący do najwyższej grupy zagrożenia.

Przykładowy schemat sposobu postępowania podczas wyboru sprzętu ochrony układu oddechowego przed zagrożeniami biologicznymi przedstawiono na rys. 4.4.

A

Dobór sprzętu ochrony układu oddechowego do zagrożeń występujących na stanowisku pracy

1. Zidentyfikuj czynniki biologiczne przenoszone drogą powietrzno-pyłową lub powietrzno-kropelkową występujące na stanowisku pracy.
2. Przyporządkuj zidentyfikowane czynniki biologiczne do grupy zagrożenia (w przypadku kilku różnych czynników biologicznych należy przyjąć najwyższą grupę zagrożenia).
3. Uwzględnij wyniki pomiarów czynników biologicznych (jeśli zostały wykonane).
4. Określ, czy ww. czynniki biologiczne mają działanie toksyczne.
5. Określ, czy ww. czynniki biologiczne mają działanie alergizujące.
6. Określ, czy ww. czynniki mogą działać szkodliwie także na twarz i oczy pracownika.
7. Określ, czy podejmowane są inne niż stosowanie sprzętu ochrony układu oddechowego środki zmniejszające ryzyko narażenia pracowników na ww. czynniki biologiczne (systemowe, organizacyjne lub techniczne).
8. Określ, czy na stanowisku pracy występuje temperatura powyżej 25 °C lub wilgotność względna powietrza powyżej 60%.

B

Dobór sprzętu ochrony układu oddechowego do czynności zawodowych

1. Opisz czynności wykonywane przez pracownika w narażeniu na wdychanie szkodliwych bioaerozoli.
2. Określ, czy ww. czynności są podzielone na etapy pracy.
3. Określ częstotliwość, z jaką wykonywane są ww. czynności.
4. Określ czas trwania narażenia pracownika na wdychanie szkodliwych bioaerozoli.
5. Określ czas trwania przerw w pracy.
6. Określ, czy pracownik przemieszcza się pomiędzy strefami różnego zagrożenia czynnikami biologicznymi lub ma kontakt z czynnikami różnego typu.

C

Dobór sprzętu ochrony układu oddechowego pod względem wymagań ergonomicznych, dopasowania i stanu zdrowia pracownika

1. Rozważ, czy istnieje potrzeba zapewnienia specjalnych systemów regulacji dopasowania sprzętu ochrony układu oddechowego do twarzy pracowników (dotyczących np. łatwego zdejmowania i zakładania przy częstych przerwach w stosowaniu sprzętu, trudności z dopasowaniem).
2. Uwzględnij wynik indywidualnego testu dopasowania sprzętu (jeśli taki wykonano).
3. Określ, czy istnieje potrzeba zastosowania innych niż sprzęt ochrony układu oddechowego środków ochrony indywidualnej (np. okularów lub gogli ochronnych).
4. Określ, czy wystąpiły przypadki zachorowania pracowników związane z wykonywaniem czynności zawodowych w narażeniu na ww. czynniki biologiczne.
5. Określ, czy ww. czynniki biologiczne stwarzają szczególne zagrożenie dla kobiet w ciąży lub pracowników młodocianych.

Rys. 4.4. Przykładowy schemat sposobu postępowania podczas wyboru sprzętu ochrony układu oddechowego przed zagrożeniami biologicznymi (źródło: własne CIOP-PIB)

4.3. Zasady bezpiecznego stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego

Właściwy sposób użytkowania sprzętu ochrony układu oddechowego stanowi niezwykle ważny element zapobiegania ryzyku zawodowemu związanemu z narażeniem na działanie czynników biologicznych. Filtry samodzielnie nie zabezpieczają układu oddechowego. Dopiero po połączeniu z odpowiednią częścią twarzową, tj. ustnikiem, ćwierćmaską, półmaską, maską lub kapturem, stanowią sprzęt o odpowiednim stopniu skuteczności ochronnej. Spośród wymienionej grupy części twarzowych najskuteczniejszą ochronę dają maski, które zapewniają dużą szczelność przylegania do twarzy pracownika. Dodatkowo maska zabezpiecza oczy i twarz użytkownika sprzętu.

Półmaska filtrująca nie wymaga kompletowania z innymi elementami sprzętu, gdyż funkcjonuje samodzielnie. Składa się z połączonych na obrzeżu układów włóknin filtracyjnych. Osłania nos, usta i brodę użytkownika. Często, w celu poprawy warunków oddychania, w półmaskach montuje się zawór wydechowy. Półmaski filtrujące są wyposażone w nagłowie, które stanowi układ taśm pasmanteryjnych, gumowych, lateksowych, zapinek lub zauszników. W tych bez zaworu wydechowego przepływ powietrza w fazie wdechu i wydechu następuje przez materiał filtrujący, a w tych z zaworem wydechowym przez materiał filtrujący i zawór wydechowy. Półmaski filtrujące często utożsamiane są z maskami chirurgicznymi stosowanymi do ochrony pacjenta w zakładach opieki medycznej. Błąd polega na tym, że maski chirurgiczne nie spełniają zasadniczych wymagań rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2016/425, na skutek czego nie są przeznaczone do ochrony pracowników przed szkodliwymi czynnikami biologicznymi. Z kolei w przypadku półmasek filtrujących zgodność z wymaganiami tego rozporządzenia jest uwidoczniona w symbolu wyrobu oraz w deklaracji zgodności UE, certyfikacie badania typu UE oraz instrukcji producenta.

Jak wspomniano, obowiązki pracodawcy związane z zapewnieniem bezpiecznego stosowania środków ochrony układu oddechowego nie dotyczą jedynie ich prawidłowego doboru do zagrożeń. Jedną z ważniejszych kwestii jest określenie bezpiecznego czasu użytkowania danego środka przez pracownika, biorąc pod uwagę czas i ciężkość pracy oraz warunki środowiskowe, tj. wilgotność, temperaturę oraz stężenie bioaerozolu. Na podkreślenie zasługuje także problem wielokrotnego użytkowania filtrów – w takim przypadku może dojść do szybkiego namnażania się mikroorganizmów zgromadzonych w materiale filtracyjnym, co stanowi źródło zagrożenia dla pracownika. Wówczas zalecane są rozwiązania w postaci sprzętu filtrującego w wersji bioaktywnej, która zapewnia hamowanie zjawiska kolonizacji mikroorganizmów w materiale filtra czy półmaski filtrującej [18-26].

Wysoki poziom skuteczności filtracji jest uzyskiwany kosztem wzrostu oporu powietrza przepływającego przez materiał filtra lub półmaski. Powoduje to trudności oddechowe, co w konsekwencji może spowodować zaprzestanie stosowania sprzętu przez pracownika lub rozluźnienie jego dopasowania. Problem ten nabiera szczególnej wagi, gdy środowisko pracy jest zanieczyszczone bioaerozolami. Ich szkodliwy wpływ na organizm człowieka w dużym stopniu zależy od indywidualnych predyspozycji i kondycji zdrowotnej pracowników. W takiej sytuacji znalezienie kompromisu pomiędzy skutecznością ochronną sprzętu a komfortem oddychania jest nie do przecenienia. Dlatego tak istotne jest rozważenie na etapie oceny ryzyka wszystkich aspektów czynności zawodowych wykonywanych z konkretnymi czynnikami biologicznymi. W szczególności należy ocenić, czy jest to czynność zamierzona w kontakcie z konkretnymi dobrze znanymi mikroorganizmami, czy też pracownicy wykonują czynności niezamierzone z czynnikami zagrożenia infekcyjnego. W pierwszym przypadku można rozważyć użycie sprzętu o niższym poziomie ochrony, przy relatywnie małym oporze oddychania, natomiast w drugim – wysoko skuteczny sprzęt ze wspomaganiem przepływu powietrza.

Należy przewidzieć, że w warunkach przemysłowych, wszędzie tam, gdzie mikroorganizmy przenoszone są na cząstkach pyłu organicznego, może dojść do szybkiego wzrostu oporu oddychania w sprzęcie. Pracownicy powinni mieć zatem możliwość częstej jego wymiany na nowy. W służbie zdrowia ten problem nie jest obserwowany, ale problemem będzie wielokrotne zakładanie i zdejmowanie sprzętu przez personel medyczny oraz ciągła zmiana miejsca pracy, a tym samym zmienne narażenie na czynniki biologiczne i możliwość przenoszenia infekcji.

Podkreślenia wymaga jeszcze jeden problem związany z doborem właściwego sprzętu ochronnego. Pracodawca, zgodnie z postanowieniami rozporządzenia MPiPS, powinien podczas doboru sprzętu uwzględnić stan zdrowia pracownika. W odniesieniu do stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego konieczne jest zatem rozważenie wszelkich dolegliwości związanych z układem oddechowym (jama nosowo-gardłowa, krtań, tchawica, oskrzela, pęcherzyki płucne), a także wszelkich alergii oddechowych i skórnych. Czynniki biologiczne, nawet gdy należą do 1. grupy zagrożenia, mogą się przyczyniać do wystąpienia dolegliwości alergicznych lub ich nasilenia.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracowników narażonych na wdychanie szkodliwego bioaerozolu niezmiernie ważne jest dopasowanie sprzętu do kształtu ich twarzy. Półmaski filtrujące oraz maski i półmaski z filtrami nie powinny być stosowane przez osoby, których broda, bokobrody oraz blizny itd. uniemożliwiają prawidłowe dopasowanie części twarzowej lub zakłócają prawidłowe funkcjonowanie zaworów oddechowych. W takim przypadku jedynie sprzęt filtrujący z wymuszonym przepływem powietrza może gwarantować skuteczną ochronę.

Każdorazowo przed użyciem każdego z typów sprzętu ochrony układu oddechowego należy sprawdzić:

- czy sprzęt nie jest uszkodzony,
- czy nie są uszkodzone zawory oddechowe,
- czy taśmy nagłowia umożliwiają szczelne dopasowanie,

- czy elementy oczyszczające (filtry) są w dobrym stanie, tzn. czy nie jest uszkodzone opakowanie jednostkowe, obudowa, oraz czy oznaczenia odpowiadają zidentyfikowanemu zagrożeniu,
- czy nie została przekroczona data ważności sprzętu,
- w wypadku sprzętu ze wspomaganiem lub z wymuszonym przepływem powietrza dodatkowo należy sprawdzić stan naładowania akumulatora oraz czy jest osiągane minimalne objętościowe natężenie przepływu dostarczanego powietrza, zgodne z instrukcją producenta.

Pracodawca powinien upewnić się, czy zastosowanie sprzętu nie spowoduje jednocześnie zwiększenia ogólnego poziomu ryzyka zawodowego. Na przykład stosowanie maski może ograniczyć pole widzenia i w konsekwencji doprowadzić do zderzenia z poruszającymi się elementami stanowiska pracy. Ponadto powinien ustalić, czy w przypadku występowania więcej niż jednego zagrożenia i konieczności stosowania kilku środków ochrony indywidualnej są one wzajemnie dopasowane, bez zmniejszania ich parametrów ochronnych. Taka sytuacja powinna być rozważona podczas stosowania półmaski filtrującej i gogli do ochrony oczu. Problemem może być brak możliwości szczelnego dopasowania obu typów środków ochronnych lub nadmierne parowanie szybek gogli spowodowane powietrzem wydychanym przez nieszczelności półmaski.

Wyposażając pracownika w środki ochrony indywidualnej należy zawsze pamiętać, że ich użytkowanie wiąże się z odczuwaniem dyskomfortu, co może być przyczyną odrzucenia ochrony przez użytkownika. Aby temu zapobiec, konieczne jest prowadzenie odpowiednich szkoleń, poprzedzających stosowanie środków ochrony. Istotnym elementem tych szkoleń powinno być informowanie o zagrożeniach i potencjalnych skutkach niestosowania środków ochrony układu oddechowego.

Piśmiennictwo

1. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r., Dz. U. 2005 Nr 81 poz. 716 z późniejszymi zmianami, Dz. U. 2008 Nr 48 poz. 288.
2. Dudkiewicz J., Górny R.L. Biologiczne czynniki szkodliwe dla zdrowia – klasyfikacja i kryteria oceny narażenia. Medycyna Pracy 2002,53, 1: 29-39.
3. Dudkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L., Szymańska J. Biologiczne czynniki zagrożenia zawodowego. Klasyfikacja, narażone grupy zawodowe, pomiary, profilaktyka. Lublin, IMW 2007.
4. Dudkiewicz J. Nauka o pracy: bezpieczeństwo, higiena i ergonomia. Lublin, Instytut Medycyny Wsi (http://archiwum.ciop.pl/14282.html dostęp dnia 22.10.2014 r.).
5. Makles Z. Zagrożenia chemiczne i biologiczne – sortownie odpadów komunalnych Bezpieczeństwo Pracy.Nauka i Praktyka 2010,462(3): 20-25.
6. Romanowska-Słomka I., Mirosławski J. Zagrożenia biologiczne na przemysłowej fermie drobiu – wyniki badań. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2009,454-455(7-8): 16-19.
7. Makles Z., Domański W. Odory w środowisku pracy rolnika-hodowcy. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2008,437(2): 10-13.
8. Gołofit-Szymczak M., Zapór L. Zagrożenia biologiczne w oczyszczalniach ścieków komunalnych. Bezpieczeństwo Pracy.Nauka i Praktyka 2007,426(3): 26-28.
9. Cyprowski M. Zanieczyszczenia mikrobiologiczne cieczy obróbkowych. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2012, 492(9): 16-19.
10. Ławniczek-Wałczyk A., Gołofit-Szymczak M., Cyprowski M., Górny R. Szkodliwe czynniki biologiczne w gabinetach stomatologicznych. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2012,492(9): 20-23.
11. Gołofit-Szymczak M., Ławniczek-Wałczyk A. Biomasa jako źródło zagrożeń biologicznych. Bezpieczeństwo Pracy.Nauka i Praktyka 2011,483(12): 17-19.
12. Górny R., Cyprowski M., Stobnicka A., Gołofit-Szymczak M.:Bezpieczeństwo biologiczne w muzeach i pracowniach konserwacji zabytków. Warszawa, CIOP-PIB 2013.
13. Ławniczek-Wałczyk A., Gołofit-Szymczak M., Cyprowski M., Górny R. Narażenie na szkodliwe czynniki mikrobiologiczne w procesie przetwarzania biomasy do celów energetycznych. Medycyna Pracy 2012,63(4): 395-407.

14. EN 143:2000/A1:2006 Sprzęt ochrony układu oddechowego. Filtry. Wymagania, badanie, znakowanie.

15. EN 149:2001+A1:2009 Sprzęt ochrony układu oddechowego. Półmaski filtrujące. Wymagania, badanie, znakowanie.

16. EN 12942:1998/A1:2002/A2:2008 Sprzęt ochrony układu oddechowego. Oczyszczający sprzęt ze wspomaganiem przepływu powietrza wyposażony w maski, półmaski i ćwierćmaski. Wymagania, badanie, znakowanie.

17. EN12941:1998/A1:2002/A2:2008 Sprzęt ochrony układu oddechowego. Oczyszczający sprzęt z wymuszonym przepływem powietrza wyposażony w hełm lub kaptur. Wymagania, badanie, znakowanie.

18. Majchrzycka K., Gutarowska B., Brochocka A., Brycki B. New filtering antimicrobial nonwovens with various carriers for biocides as respiratory protective materials against bioaerosol. International Journal of Occupational Safety and Ergonomic 2012,3: 375-385.

19. Gutarowska B., Skóra J., Nowak E., Łysiak I., Wdówka M. Antimicrobial activity of filtration effectiveness of nonwovens with sanitized for Respiratory Protective Equipment. Fibres & Textiles In Eastern Europe 2014,105(3): 120-125.

20. Gutarowska B., Michalski A. Antimicrobial activity of filtrating Meltblown nonwoven with the additions of silver ions. Fibres & Textiles In Eastern Europe 2009,74(3): 23-28.

21. Brochocka A., Majchrzycka K. Technology for the production of bioactive Melt-blown filtration materials applied to Respiratory Protective Devices. Fibres & Textiles in Eastern Europe 2009,76(5): 92-98.

22. Woo M., Grippin A., Wu C., Baney R.H. Use of dialdehyde starch treated filters for protection against airborne viruses. Journal of Aerosol Science 2012,46: 77-82.

23. Tiliket G., Sage D., Moules V., Rosa-Calatrava M., Lina B., Valetton J., Nguyen Q.T., Lebrun L. A new material for airborne virus filtration. Chemical Engineering Journal 2011,173: 341-351.

24. Heimbuch B., Wander J.D. Bioaerosol challenges to antimicrobial surface treatments: enhanced efficacy against MS2 Coli Phage of air filter media coated with Polystyrene-4-Methyltrimethylammonium Triiodide. Air Force Research Laboratory, 2006.

25. Majchrzycka K., Brochocka A. Modyfikacja biodegradowalnych włóknin filtracyjnych środkiem biobójczym. Przetwórstwo Tworzyw 2013,153 (3): 217-222.

26. Majchrzycka K., Okrasa M., Szulc J., Brycki B., Gutarowska B. Time--Dependent Antimicrobial Activity of Filtering Nonwovens with Gemini Surfactant-Based Biocides, Molecules 2017, 22,1620.

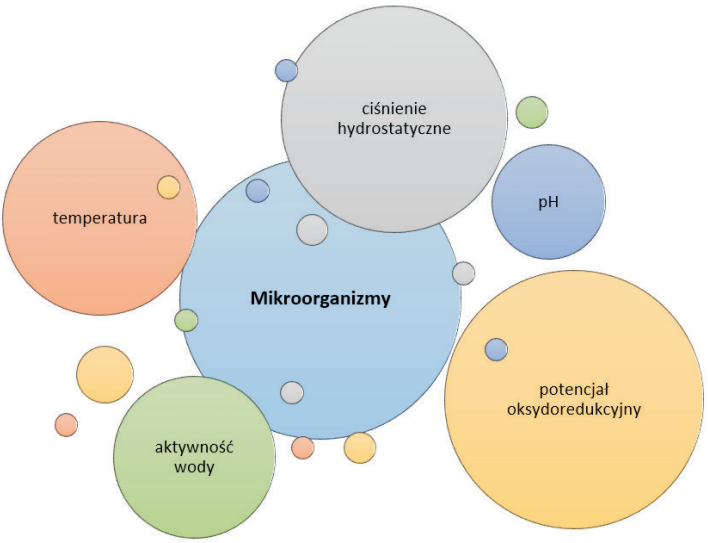
5. Charakterystyka zjawisk zachodzących w sprzęcie filtrującym

Na bezpieczeństwo stosowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego zdecydowany wpływ ma zdolność mikroorganizmów do przeżywania i rozwoju we włókninach filtracyjnych. Mikroorganizmy bowiem są w różnym stopniu wrażliwe na czynniki środowiska zewnętrznego. Niektóre, np. wirusy grypy, bardzo szybko giną w środowisku zewnętrznym, inne, np. prątki gruźlicy, mogą swą zdolność do zakażania nowych organizmów utrzymywać przez wiele miesięcy. Ponadto najtrwalsze i najdłużej utrzymujące się w powietrzu są cząstki zaopatrzone w otoczkę białkową, a więc te, które wydostają się z dróg oddechowych użytkownika sprzętu. Gdy środowiskiem ich bytowania jest przestrzeń wewnątrz sprzętu ochrony układu oddechowego, wówczas mogą w określonych warunkach (np. w przypadku słabej odporności immunologicznej osób narażonych) wywoływać stany zapalne dróg oddechowych, miejscowe infekcje oraz zakażenia tkanek i narządów, prowadząc w skrajnych przypadkach do wstrząsu toksycznego. Najczęściej mikroorganizmy typowe dla człowieka należą do grupy 1. lub 2. grupy zagrożenia, co oznacza, że mogą być niebezpieczne dla pracowników, ale zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia.

Rozwojowi mikroorganizmów wewnątrz materiału filtracyjnego sprzętu sprzyja wiele czynników. Najważniejsze z nich omówiono w kolejnych podrozdziałach.

5.1. Czynniki sprzyjające rozwojowi mikroorganizmów

Główne czynniki, które kształtują przeżywalność oraz intensywność wzrostu mikroorganizmów w środowisku to: temperatura, pH (stężenie jonów wodorowych), potencjał oksydoredukcyjny, aktywność wody i ciśnienie hydrostatyczne (rys. 5.1.).



Rys. 5.1. Najważniejsze czynniki wpływające na wzrost mikroorganizmów w środowisku (źródło: własne PŁ)

Kluczowym czynnikiem, wpływającym na wzrost mikroorganizmów w środowisku, jest temperatura. Oddziałuje ona na mikroorganizmy, bezpośrednio warunkując szybkość wzrostu, aktywność enzymatyczną, skład chemiczny komórek i ich wymagania pokarmowe. Pośrednio temperatura reguluje rozpuszczalność związków wewnątrzkomórkowych, transport jonów, dyfuzję substancji chemicznych i zmianę cech osmotycznych błon komórkowych.

Najniższą temperaturą, w jakiej mogą rozwijać się mikroorganizmy jest -23 ˚C (bakterie *Corynebacterium* oraz pleśnie *Sporobolomyces*), a najwyższą 121 ˚C (hipertermofilny archeon, szczep 121). Nie istnieją jednak mikroorganizmy, które zdolne byłyby do wzrostu w całym tym zakresie temperatur [1]. Dla każdego gatunku można wyznaczyć tzw. temperatury kardynalne, tj. minimalną, optymalną i maksymalną temperaturę wzrostu. Najkorzystniejsza dla mikroorganizmów jest temperatura optymalna, w której procesy rozmnażania i reakcje enzymatyczne przebiegają najszybciej. Poniżej temperatury minimalnej oraz

maksymalnej dla danego gatunku jego wzrost nie jest możliwy ze względu na zaburzenia funkcjonowania błon, denaturację białek i zniszczenia błony cytoplazmatycznej [2].

Drobnoustroje ze względu na zakresy temperatur kardynalnych można podzielić na 5 grup: psychrofile, psychrotrofy, mezofile, termofile i hipertermofile. Psychrofile i psychrotrofy należą do mikroorganizmów zimnolubnych, o optymalnej temperaturze wzrostu nieprzekraczającej 20 ˚C. Mają także zdolność do wzrostu w środowiskach o okresowych wahaniach temperatur. Stanowią one grupę szeroko rozpowszechnioną w środowisku, zasiedlają m.in. jeziora, morza, oceany, gleby, szczyty górskie i rejony podbiegunowe. W tej grupie mikroorganizmów występują również bakterie patogenne, np. *Listeria monocytogenes, Yersinia enterolitica* i *Bacillus cereus* [1-3].

W temperaturach umiarkowanych (od 20 do 45 ˚C) dominuje wzrost mikroorganizmów mezofilnych. Stanowią one liczną grupę mikroorganizmów występujących w środowisku (w tym w bioaerozolach); wśród nich znajdują się zarówno gatunki saprofityczne, jak i chorobotwórcze dla ludzi. Wynika to z faktu, iż temperatura ciała człowieka mieści się w zakresie optymalnej temperatury wzrostu tej grupy mikroorganizmów. Do mezofili zaliczyć należy także mikroorganizmy o potencjale biotechnologicznym, takie jak bakterie fermentacji mlekowej, bakterie octowe, grzyby prowadzące biosyntezę kwasów octowych, drożdże piekarskie i gorzelnicze, które mogą być stosowane podczas pracy z celowym użyciem czynników biologicznych.

W wysokich temperaturach (> 60 ˚C) doskonałe warunki do wzrostu znajdują mikroorganizmy termofilne i hipertermofilne. Występują one w specyficznych środowiskach, takich jak kompost, nawóz organiczny, siano, kiszonki, gleba. Hipertermofile znajdowane są w środowiskach ekstremalnych, np. gorących źródłach, gejzerach, osadach geotermicznych, urządzeniach grzewczych. Niektóre mikroorganizmy termofilne stanowią czynniki biologiczne celowo wykorzystywane w środowisku pracy, w przemyśle biotechnologicznym – jak np. bakterie fermentacji

mlekowej wchodzące w skład zakwasów jogurtowych oraz wykorzystywane do biosyntezy kwasu mlekowego [1-3].

Stężenie jonów wodorowych w środowisku stanowi kolejny kluczowy parametr, wpływający na wzrost mikroorganizmów. Każdy gatunek mikroorganizmu charakteryzuje się przedziałem pH, w którym zdolny jest do funkcjonowania. Większość bakterii może rozwijać się w wąskim zakresie pH, natomiast liczne grzyby strzępkowe w szerokim, nawet od pH 2 do 9 [1]. Podobnie jak w przypadku temperatury, wyróżnia się dla każdego mikroorganizmu pH minimalne, maksymalne oraz optymalne. W zależności od optymalnego pH wzrostu mikroorganizmy dzieli się na neutrofile, acydofile i alkalofile [1].

Do neutrofili zaliczamy mikroorganizmy o optymalnym dla wzrostu pH bliskim obojętnemu, około 6-7,5 i stanowią one większość poznanych mikroorganizmów, szczególnie bakterii. Mikroorganizmy acidofilne to takie, które zdolne są do funkcjonowania w środowisku o pH < 4. Występują one w środowiskach ekstremalnych, takich jak złoża żelaza i siarki, wody kopalniane, gleba wulkaniczna. Do acydofili zaliczamy bakterie fermentacji mlekowej czy octowej, liczne gatunki drożdży i pleśni. Alkalofile stanowią mikroorganizmy o pH optymalnym do wzrostu w zakresie 8-11. Grupa ta obejmuje wiele gatunków bakterii, w tym chorobotwórcze *Vibrio choleare* (przecinkowiec cholery) czy *Streptococcus pneumoniae* (paciorkowiec zapalenia płuc), archeony i sinice [1-3].

Innym bardzo ważnym parametrem wpływającym na możliwość wzrostu mikroorganizmów jest procentowa zawartość wody w środowisku i stężenie substancji w niej rozpuszczonych. Zapotrzebowanie mikroorganizmów na wodę określa się terminem aktywność wody (aw). Co ważne, im mniej związków rozpuszczonych w wodzie, tym większy jej zasób dostępny jest dla komórek mikroorganizmów. Dla każdego gatunku mikroorganizmu można wyznaczyć wartość aktywności wody minimalną, optymalną i maksymalną [1-3].

Przy stosunkowo niskich wartościach aktywności wody (0,6-0,91) mogą rozwijać się grzyby, zwłaszcza gatunki kserofilne (sucholubne),

takie jak np. *Xeromyces* izolowany z suszonych owoców. Podobnie większość drożdży może rozwijać się przy aw 0,88, a czasem nawet niższej (gatunki osmofilne i osmotolerancyjne). Najbardziej wrażliwe na niską aktywność wody w środowisku są bakterie. Większość z nich może rozwijać się jedynie w zakresie aw wynoszącym 0,96-0,99. Nieliczne gatunki chorobotwórcze, takie jak *Staphylococcus aureus* mogą rozwijać się przy aw równej 0,85. Jedynie bakterie i archeony halofilne (np. *Halomonas, Halobacter, Halococcus, Vibrio, Pseudomonas, Bacillus, Marinococcus*) o dużym zapotrzebowaniu na NaCl mogą funkcjonować przy aw wynoszącej 0,75. Występują one w nielicznych środowiskach: wodzie morskiej, słonych glebach, solonej żywności.

Niektóre mikroorganizmy przystosowały się do bytowania w środowiskach o niskiej aktywności wody poprzez wytwarzanie form przetrwalnych. Przetrwalniki bakterii z rodzaju *Bacillus* mogą w stanie uśpienia (anabiozy) przetrwać wiele lat w oczekiwaniu na odpowiednią do rozpoczęcia kiełkowania wilgotność środowiska [1-3].

Następny ważny czynnik warunkujący wzrost mikroorganizmów w środowisku to potencjał oksydoredukcyjny (Eh). Parametr ten związany jest ze zdolnością środowiska hodowlanego do utleniania się lub redukcji, co w praktyce determinowane jest dostępem do tlenu. Pod względem zapotrzebowania na tlen mikroorganizmy dzielimy na bezwzględnie beztlenowe, względne beztlenowe i tlenowe [1,2].

Bezwzględne beztlenowce to mikroorganizmy zdolne do wzrostu tylko w warunkach beztlenowych, a więc przy ujemnym potencjale oksydoredukcyjnym. Mikroorganizmy te są charakterystyczne dla specyficznych środowisk, np. osadów i mułów dennych, wód podziemnych, bagien i podmokłych gleb, przewodu pokarmowego człowieka i zwierząt. Oprócz bakterii bezwzględnie beztlenowych do tej grupy mikroorganizmów zaliczyć należy metanogenne archeony występujące w wodach gejzerów, szczelinach wulkanicznych, pokładach torfu, ropy czy gazu ziemnego [1,3].

Względne beztlenowce zdolne są do wzrostu zarówno w ujemnych, jak i dodatnich wartościach potencjału Eh. Do tej grupy zalicza się liczne gatunki bakterii, grzybów i pierwotniaków. Można je znaleźć w środowiskach o zmiennych warunkach tlenowych. Wśród nich wyróżniamy mikroorganizmy uzyskujące energię jedynie na drodze fermentacji lub takie, które czerpać energię mogą zarówno z fermentacji, jak i oddychania tlenowego w zależności od wartości potencjału oksydoredukcyjnego środowiska. Przykładem tych drugich mogą być drożdże *Saccharomyces cerevisiae* wykorzystywane w przemyśle biotechnologicznym. Gatunek ten w obecności tlenu szybko namnaża swoją biomasę, co znalazło zastosowanie w produkcji drożdży piekarskich, natomiast w warunkach beztlenowych prowadzi fermentację wykorzystywaną w produkcji napojów alkoholowych.

Do tlenowców zaliczamy mikroorganizmy, które rosną przy Eh wynoszącym 0,2-0,4 V. Obecność tlenu jest warunkiem koniecznym do ich wzrostu. Do tej grupy mikroorganizmów należy wiele gatunków bakterii i drożdży oraz większość grzybów strzępkowych. Duża ich liczba znalazła zastosowanie przemysłowe np. w produkcji kwasów organicznych czy antybiotyków. Równocześnie stanowią one także częsty problem zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza [1].

Istotne znaczenie dla przeżywalności mikroorganizmów w środowisku ma ciśnienie hydrostatyczne. Wysokie ciśnienie hydrostatyczne utrzymywane przez dłuższy czas hodowli powoduje zmiany ultrastruktury komórek i ich składu chemicznego. Polegają one m.in. na zmniejszeniu zawartości polisacharydów i fosfolipidów, zaburzeniach funkcjonowania błon komórkowych, zaburzeniach w biosyntezie białek i ich strukturze czy aktywności enzymów.

Ze względu na reakcję mikroorganizmów na ciśnienie hydrostatyczne można wyróżnić mikroorganizmy wrażliwe, średnio wrażliwe i oporne. Najbardziej wrażliwe na wysokie ciśnienie hydrostatyczne są bakterie gramujemne, mniej grzyby i najmniej bakterie gramdodatnie. Mikroorganizmy, które wykazujące dużą tolerancję na wysokie ciśnienie nazywa się piezofilami. W środowisku naturalnym takie mikroor-

ganizmy występują w głębinach mórz i oceanów i są to np. bakterie *Colwellia, Moritella, Shewanella* oraz archeony *Methanotermococcus* czy *Thermococcus*.

Największą opornością na działanie wysokich ciśnień, podobnie jak na niską aktywność wody, cechują się formy przetrwalne mikroorganizmów. Spory bakterii *Bacillus sublilis* nie tracą zdolności do kiełkowania nawet po działaniu ciśnienia 900 MPa, a konidia pleśni *Aspergillus niger* przy ciśnieniu 1000 MPa. Co ciekawe, niskie ciśnienie hydrostatyczne oraz próżnia nie wpływają w istotny sposób na komórki mikroorganizmów. Na niskie ciśnienie wrażliwe są jedynie bakterie gramujemne: *Pseudomonas fluorescens* i *Escherichia coli* [1-3].

Na przeżywalność mikroorganizmów w bardzo różny sposób może wpływać wiele innych czynników, np. napięcie powierzchniowe, fale dźwiękowe i ultradźwiękowe, promieniowanie, obecność kationów anionów czy związków o działaniu biostatycznym i biobójczym (substancji przeciwdrobnoustrojowych) w środowisku.

Wszystkie wymienione czynniki decydują przede wszystkim o szybkości wzrostu oraz aktywności metabolicznej mikroorganizmów. Ich działanie zależy od rodzaju czynnika, jego intensywności oraz od cech konkretnego szczepu mikroorganizmu. Czynniki o działaniu bójczym wobec jednej grupy mikroorganizmów mogą być sprzyjające dla wzrostu innych, w zależności od ich morfologii, charakterystyki biochemicznej i innych wymagań. Należy pamiętać, że w środowisku czynniki te działają jednocześnie i dopiero ich wypadkowa decyduje o rzeczywistym wzroście populacji mikroorganizmów. Ponadto mikroorganizmy nigdy nie występują w środowisku w postaci pojedynczych gatunków, a mieszaniny najczęściej kilku – kilkudziesięciu przedstawicieli różnych grup fizjologicznych. Dlatego też na ich wzrost wpływać mogą różne interakcje występujące pomiędzy poszczególnymi gatunkami.

Udowodniono, że mikroorganizmy, dzięki obecności wielu substancji sygnałowych, systemów ich wykrywania i mechanizmów przekazywania, zdolne są do porozumiewania się między sobą w obrębie

gatunku oraz pomiędzy różnymi gatunkami, co określa się terminem quorum sensing [4-6]. Proces komunikowania się mikroorganizmów zwiększa ich szansę na zasiedlenie i przeżycie w środowisku oraz adaptację do zmiany panujących tam warunków [1]. Quorum sensing występuje także podczas powstawania i rozwoju infekcji, patogenezy chorób przewlekłych oraz w tworzeniu bioflmów [5,7,8].

Badanie wpływu poszczególnych czynników środowiskowych na przeżywalność i wzrost mikroorganizmów ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Dostarcza informacji niezbędnych m.in. do prawidłowego (skutecznego) utrwalania żywności, efektywnej symulacji aktywności metabolicznej mikroorganizmów stosowanych w biotechnologii czy też pozyskiwania i selekcji szczepów środowiskowych do celów przemysłowych. Pozwala również zrozumieć zjawiska zachodzące w środowiskach naturalnych, takie jak sukcesja, ekspansja czy zamieranie mikroorganizmów.

W aspekcie środowiska pracy należy pamiętać, że mikroorganizmy stanowiące szkodliwe czynniki biologiczne są w nim obecne głównie w postaci bioaerozolu. Zarówno liczba, rodzaje mikroorganizmów oraz ich przeżywalność będą w takim przypadku ściśle związane ze specyfiką danego miejsca pracy. Do najważniejszych elementów charakteryzujących konkretne środowisko pracy powinno zaliczyć się jego lokalizację (umiejscowienie w budynku lub na otwartej przestrzeni), cechy lokalowe (wentylacja, klimatyzacja, rodzaj materiałów konstrukcyjnych, intensywność nasłonecznienia, stan higieniczny, częstość wietrzenia i sprzątania) oraz parametry mikroklimatu (temperatura, wilgotność względna powietrza, zapylenie). Parametry te będą zupełnie inne w różnych środowiskach pracy, np. w pomieszczeniach służby zdrowia, pomieszczeniach inwentarskich do hodowli zwierząt czy oczyszczalni ścieków miejskich.

W środowiskach pracy w pomieszczeniach najwięcej mikroorganizmów spodziewać się można w miejscach zaciemnionych, zawilgoconych, bez wentylacji, o złym stanie higienicznym i wysokim

zapyleniu. Dużej liczbie mikroorganizmów sprzyja temperatura ok. 20 °C i wilgotność względna powietrza powyżej 50%. Występowanie przegród budowlanych z oznakami zalania i rozwoju grzybów stanowi często dodatkowe źródło, z którego mikroorganizmy dostają się do powietrza.

Należy mieć na uwadze, że również sami pracownicy mają wpływ na występowanie i przeżywalność mikroorganizmów na stanowiskach pracy. Do czynników związanych z personelem sprzyjających namnażaniu się mikroorganizmów należą m.in. duża liczba pracowników, intensywne ich przemieszczanie się, brak dbałości o higienę, niewłaściwe stosowanie środków ochrony indywidualnej, emisja wydzielin (potu, śliny) oraz zły stan zdrowia (infekcja, nosicielstwo).

Należy pamiętać, że wpływ czynników środowiska na przeżywalność mikroorganizmów w miejscach pracy jest bardzo złożony i trudny do jednoznacznego zdefiniowania. Wpływ tych czynników powinien być rozpatrywany indywidualnie dla każdego miejsca pracy, biorąc pod uwagę jego specyfikę.

5.2. Zastosowanie modelowania prognostycznego w ocenie narażenia inhalacyjnego i biobezpieczeństwa stosowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego

Obecnie poszukuje się nowoczesnych narzędzi, które pozwoliłyby na łatwą i szybką ocenę narażenia inhalacyjnego pracowników w środowiskach pracy oraz określanie zjawisk zachodzących w sprzęcie filtrującym podczas jego użytkowania. Zadania te mogą być realizowane z wykorzystaniem modelowania prognostycznego.

5.2.1. Modelowanie prognostyczne

Opracowywaniem modeli matematycznych opisujących reakcje mikroorganizmów na określone warunki środowiskowe zajmuje się

mikrobiologia prognostyczna, zwana także prognozowaniem mikrobiologicznym. Jest to dyscyplina naukowa wykorzystująca głównie wiedzę mikrobiologiczną, matematyczną, statystyczną, informatyczną i bioinformatyczną, której zadaniem jest zarówno konstruowanie modeli, jak również weryfikacja ich przydatności m.in. do przewidywania wzrostu, przeżywalności lub inaktywacji mikroorganizmów w środowisku [9-12].

Opracowywanie modeli prognostycznych najlepiej rozpoznane jest w aspekcie badań nad bakteriami chorobotwórczymi mogącymi występować w żywności. Modele te dotyczyły takich rodzajów bakterii o szczególnym znaczeniu dla bezpieczeństwa żywności, jak: *Salmonella, Escherichia coli, Listeria monocytogenes* oraz *Campylobacter jejuni*. Modele dotyczące zachowania mikroorganizmów wykorzystywano głównie w odniesieniu do mięsa, wyrobów mięsnych, mleka i produktów mleczarskich, rzadziej owoców i warzyw [13-15].

Obecnie najważniejsze zadania mikrobiologii prognostycznej obejmują [9,12]:

- modelowanie dynamiczne (uwzględniające interakcje między mikroorganizmami),
- modelowanie wzrostu i przeżywalności, uwzględniające aktualną wiedzę o fizjologii poszczególnych mikroorganizmów,
- modelowanie granic wzrostu/braku wzrostu mikroorganizmów w funkcji parametrów środowiska,
- modelowanie prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnego poziomu mikroorganizmów w funkcji czasu,
- zaawansowane modelowanie struktury i zmienności środowiska,
- modelowanie kinetyki poszczególnych komórek poprzez połączenie deterministycznego modelowania na poziomie populacji z oceną statystyczną i charakterystyką zmienności na poziomie pojedynczych komórek,
- analizę danych dotyczących włączania genów w zależności od dynamicznie zmieniającego się otoczenia (mikrobiologia molekularna),

- modelowanie zmienności mikroorganizmów i ich tolerancji na stres,
- modelowanie w odniesieniu do mikroorganizmów saprofitycznych, psychrotrofów i innych specyficznych zakażeń środowiskowych,
- modelowanie przeżywalności mikroorganizmów w pozażywnościowych środowiskach, np. w powietrzu, materiałach filtracyjnych,
- rozwój mikrobiologii obliczeniowej i bioinformatyki (np. przechowywanie i wyszukiwanie danych w bardziej zaawansowany sposób).

Modelowanie standardowo wykonuje się na podstawie badań w płynnych pożywkach mikrobiologicznych, o ściśle określonym składzie chemicznym. Z tego względu prognozowany wzrost liczby komórek mikroorganizmów często różni się od obserwowanego w rzeczywistych warunkach. Problem ten jest szczególnie istotny w skomplikowanych środowiskach, w których istnieje wiele parametrów zmiennych oraz występują wzajemne interakcje pomiędzy różnymi gatunkami mikroorganizmów. Dlatego istnieje uzasadniona konieczność opracowania modeli prognostycznych opartych na badaniach mikrobiologicznych w warunkach jak najbardziej przypominających warunki rzeczywiste [15].

5.2.2. Rodzaje modeli prognostycznych

W mikrobiologii prognostycznej bardzo skomplikowane procesy i zależności środowiskowe muszą być ujęte w możliwie jak najprostszym modelu prognostycznym, przy zachowaniu specyfiki danego mikroorganizmu oraz użyteczności stosowanego modelu [16]. Modelowanie opiera się głównie na technikach regresji liniowej i nieliniowej [17].

Wyróżnia się 3 grupy modeli matematycznych w zależności od informacji, których dostarczają. Są to: modele wzrostu mikroorganizmów, modele inaktywacji mikroorganizmów oraz modele zbiorcze (rys. 5.2.) [18-20].

Istnieje również podział modeli prognostycznych na probabilistyczne i kinetyczne oraz na pierwszo-, drugo- i trzeciorzędowe [21,22].

Rys. 5.2. Rodzaje modeli matematycznych stosowanych w mikrobiologii prognostycznej (źródło: własne PŁ)

Najlepiej opisanymi w literaturze modelami stosowanymi w mikrobiologii prognostycznej są modele wzrostu drobnoustrojów. Najczęściej dotyczą one mikroorganizmów, które nawet w niewielkiej liczbie mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi [16]. Założenia wykorzystywane w tego typu modelach wynikają z wiedzy na temat wzrostu mikroorganizmów w kontrolowanych warunkach.

Najczęściej używanym modelem stosowanym do opisu wzrostu mikroorganizmów jest równanie Gompertza (model pierwszorzędowy). Stanowi ono czteroparametrową funkcję opisującą asymetryczną krzywą sigmoidalną [23]. Parametry wzrostu mikroorganizmów w równaniu Gompertza można wyrazić jako: wykładniczą szybkość wzrostu; czas generacji; czas trwania lag fazy oraz maksymalną gęstość populacji. Dane w takiej postaci dostarczają mikrobiologom najważniejszych informacji charakteryzujących wzrost badanej populacji. Szczególnie ważny jest czas trwania lag fazy (fazy pierwotnego zahamowania, inaczej fazy adaptacyjnej), ponieważ określa proces przemian mikroorganizmu, podczas których przystosowuje się on do nowych

warunków środowiska, co odgrywa istotną rolę w całym cyklu życia komórki. Wzór Gompertza może być stosowany we współpracy z odpowiednim oprogramowaniem, np. Pathogen Modeling Program [11,24].

W modelach inaktywacji ocenia się reakcję wybranych mikroorganizmów na czynniki ograniczające ich rozwój i rozmnażanie, takie jak inaktywacja termiczna, wrażliwość na różne temperatury, wrażliwość na zróżnicowany czas ogrzewania oraz promieniowanie gamma [16]. Do tej grupy zaliczyć należy model opracowany w roku 1922 przez Esty & Meyer [25]. Jest to logarytmiczno-liniowy model wykorzystany do opisania śmierci populacji zarodników *Clostridium botulinum* typu A, poddanych działaniu wysokiej temperatury. Opiera się on na założeniu, że w danej temperaturze względny wskaźnik śmiertelności bakterii jest stały w czasie [10].

Modele zbiorcze pozwalają na opracowanie warunków wzrostu, przeżywalności i inaktywacji mikroorganizmów będących obiektem badań. Mają one obecnie bardzo szerokie zastosowanie w mikrobiologii prognostycznej. Można je wykorzystać np. do przewidywania okresu przydatności produktów do spożycia, prognozowania bezpieczeństwa mikrobiologicznego produktów przy zmianie składu lub technologii produkcji, przewidywania niezgodności w procesie produkcyjnym oraz problemów w przechowywaniu i transporcie [22,26-28]. Na tego rodzaju modelach oparte są stworzone w Stanach Zjednoczonych wspomniany już Pathogen Modeling Program oraz ComBase Predictor.

Modele probabilistyczne (oparte na prawdopodobieństwie) stosowane są w odniesieniu do bakterii przetrwalnikujących, szczególnie *Clostridium botulinum*, których nawet najmniejszy wzrost może zagrażać zdrowiu człowieka [29]. Modele te konstruowane są na podstawie założenia, że pojedynczy przetrwalnik *C. botulinum* rozwinie się i wyprodukuje toksyny w żywności (założenie Hauschilda). Do tego rodzaju modelowania wykorzystuje się różne metody analizy regresji [30-32].

Modele kinetyczne opracowywane są głównie dla nieprzetrwalnikujących patogenów, szczególnie tych, które są niebezpieczne dopiero

w momencie przekroczenia pewnego progu wzrostu. Opisują one matematycznie zmiany w populacji mikroorganizmów w czasie, a także wpływ warunków środowiska na kinetykę ich wzrostu, szczególnie czas trwania lag fazy i czas regeneracji. Wśród tej grupy należy rozróżnić cztery podstawowe typy modeli: modele „pierwiastka kwadratowego", modele Arrheniusa, modele Davey'ego oraz modele wielomianowe [21,33,34].

Model pierwszorzędowy (statyczny) opisuje kinetyczne parametry mikroorganizmów przy założeniu, że warunki środowiska pozostają niezmienne. Statycznych modeli nie bierze się pod uwagę przy zmianach takich parametrów otoczenia, jak np. temperatura [35]. Najczęściej modele te stanowią krzywe wzrostu lub przeżywalności mikroorganizmów [36]. Najbardziej rozpowszechnionymi modelami pierwszorzędowymi są model Gompertza i model Baranyi [9].

Modele drugorzędowe (dynamiczne) są równaniami opisującymi zmiany parametrów modeli pierwotnych pod wpływem zmian czynników środowiskowych (np. pH, aktywność wody, stężenie kwasów organicznych). Do najczęściej stosowanych w tej grupie należą model Arrheniusa, pierwiastka kwadratowego Ratkowskiego i model Gamma Zwiteringa [36,15].

Modele trzeciorzędowe są komputerowymi arkuszami kalkulacyjnymi (systemami), złożonymi z modeli pierwszego i drugiego rzędu, służącymi do symulacji zachowania się mikroorganizmów w określonych warunkach. Wiele z nich oferowanych jest w postaci przyjaznych użytkownikowi pakietów programów komputerowych dostępnych on-line [36,37]. Przykładami takich modeli są Growth Predictor, ComBase Predictor i Pathogen Modeling Program.

Techniki obliczeniowo-statystyczne wykorzystywane są także do opracowywania tzw. sieci neuronowych (neural networks), służących do komputerowej symulacji pracy mózgu. Zastosowanie sieci neuronowych co roku jest większe i oprócz nauk technicznych obejmuje także medycynę, ekonomię a nawet nauki społeczne [38]. Sieci neuronowe

znalazły zastosowanie m.in. do przewidywania wartości pewnej zmiennej na podstawie jej wcześniejszych wartości, aproksymacji w przestrzeni, sterowania układami dynamicznymi, filtrowania sygnałów oraz kompresji obrazu i dźwięku [16].

W praktyce najczęściej wykorzystuje się sieci o budowie wielowarstwowej, zawierające warstwę wejściową i wyjściową oraz warstwy ukryte [39]. Działanie sieci neuronowej polega na uogólnieniu wiedzy i wykryciu zależności między zmiennymi poprzez aproksymację pewnej funkcji wielu zmiennych. Oznacza to, że w procesie „uczenia się" sieć tworzy statystyczny model badanej zależności. Sieć neuronowa jest cenionym narzędziem w mikrobiologii prognostycznej. Szczególnie przydatna jest do monitorowania, kontroli i optymalizacji warunków przebiegu procesu biotechnologicznego oraz przewidywania wydajności biosyntezy pożądanego produktu lub metabolitu [40-42].

W praktyce do najczęściej wykorzystywanych sieci neuronowych zalicza się: sieci liniowe, MLP (Multi-Layer Perceptron), RBF (Radial Basis Functions), Kohonena i Hopfielda. Korzystanie z nich możliwe jest za pośrednictwem takich programów, jak Neural Networks Toolbox for Matalb (obecnie występujący pod nazwą Deep Learning Toolbox), Statistical Neural Networks i Mathematical Neural Networks. Należy zwrócić uwagę, iż technologia sieci neuronowych nie jest pozbawiona wad. Przypisuje się im małą precyzyjność i jasność działania, trudności w interpretacji wyników, brak znajomości algorytmu obliczeń oraz możliwość uzyskania jedynie bezpośrednich wniosków [38]. Dlatego też sieci neuronowe wciąż stanowią przyszłość prognozowania mikrobiologicznego. Uważa się, że narzędzie to pozwoli w najbliższym czasie na uwzględnianie dynamiki zachowań populacji mikroorganizmów w środowisku, z uwzględnieniem pomijanych w innych narzędziach prognostycznych interakcji między mikroorganizmami [14].

Należy podkreślić, że pomimo dostępności wielu rodzajów modeli najczęściej stosowanym w prognozowaniu mikrobiologicznym jest model Gompertza. Chociaż założenia tego modelu powstały już w 1825 r.

(pierwotnie był on stosowany przez firmy ubezpieczeniowe do obliczania kosztów ubezpieczenia na życie), wciąż jest bardzo użyteczny i pozwala w zadowalający sposób opisać dane eksperymentalne za pomocą prostego równania [43]. Co więcej, krzywa Gompertza jest jedynym modelem matematycznym, który został zaakceptowany przez środowisko medyczne do opisu wzrostu nowotworów i funkcjonuje do dziś. Model ten stosowany jest też w naukach rolniczych m.in. do oceny zmian masy ciała zwierząt, opisu kinetyki wzrostu roślin, jak również określania jednostkowych kosztów eksploatacji maszyn rolniczych w zależności od czasu ich wykorzystania oraz uzyskiwanych wydajności eksploatacyjnych [44-47]. W literaturze znaleźć można także wiele innych zastosowań modelu Gompertza w mikrobiologii, biotechnologii i innych dyscyplinach naukowych [48-54].

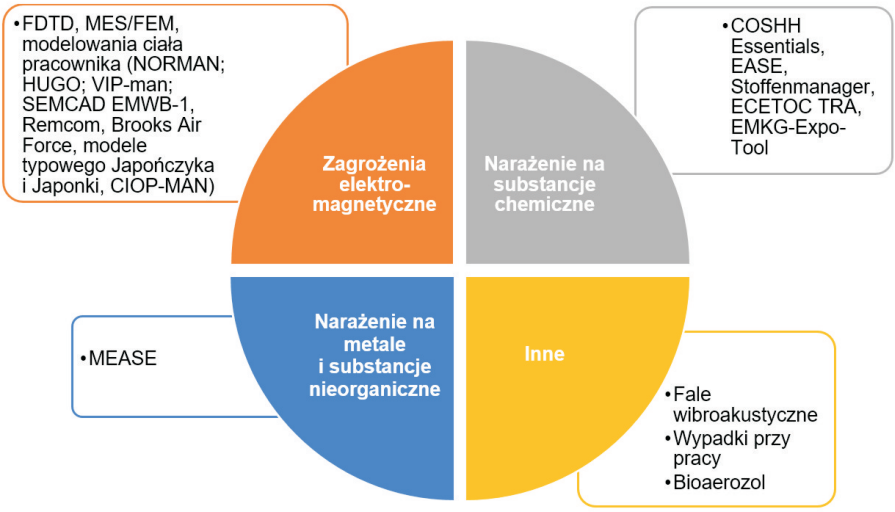
Należy zdać sobie sprawę, że obecnie nie istnieje jeden model, który byłby uniwersalny i miał najlepszy stopnień dopasowania. Wszystkie modele stosowane w mikrobiologii prognostycznej reprezentują skomplikowany i rozbudowany kompleks biochemicznych procesów zachodzących w komórkach mikroorganizmów i muszą być upraszczane, gdyż nie są w stanie przewidzieć wszystkich interakcji, jakie zachodzą pomiędzy komórką a czynnikami środowiska oraz pomiędzy samymi komórkami [46]. Uproszczanie to polega na ograniczaniu liczby wyjściowych parametrów decydujących o rozwoju, przeżywalności lub inaktywacji mikroorganizmów. Model musi być więc na tyle prosty, aby być użyteczny i na tyle złożony, aby dokładnie prognozować [55]. Uważa się, że modele z jedną – dwiema zmiennymi są równie praktyczne w użyciu, jak uwzględniające wiele zmiennych modele powierzchni odpowiedzi [56].

5.2.3. Modelowanie zagrożeń inhalacyjnych w środowiskach pracy

Modelowanie matematyczne (prognostyczne) jest techniką przydatną w szacowaniu narażenia na niemal wszystkie rodzaje szkodliwych

czynników w środowisku pracy. Wykorzystać je można do oceny narażenia na substancje chemiczne, substancje nieorganiczne i metale, zagrożeń elektromagnetycznych (w tym modelowania ciała pracownika) i wibroakustycznych. Znalazło ono także zastosowanie do tworzenia symulacji wypadków przy pracy i modelowania zagadnień związanych z szeroko pojętym narażeniem na bioaerozol.

Najważniejsze sposoby wykorzystania modelowania matematycznego i symulacji komputerowych w odniesieniu do środowisk pracy zestawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Wykorzystanie modelowania matematycznego i komputerowego w odniesieniu do środowisk pracy (źródło: własne PŁ)

Modelowanie matematyczne stanowi istotne narzędzie w szacowaniu narażenia inhalacyjnego na szkodliwe substancje chemiczne [57]. Jego aplikacja pozwala uniknąć czasochłonnych i kosztownych analiz oraz umożliwia wykonanie oceny ryzyka samodzielnie przez pracodawców. Wśród modeli uproszczonej, bezpomiarowej metody oceny narażenia inhalacyjnego na związki chemiczne należy wymienić COSHH Essentials (Control of Substances Hazardous to Health), pozwalający

na opracowanie zaleceń dla poszczególnych procesów pracy w formie Karty Wytycznych Prewencji (Control Guidance Sheets) oraz Program Szacowania i Oceny Narażenia na Substancje EASE (Estimation and Assessment of Substance Exposure), który polega na wykonaniu retrospektywnej oceny narażenia i prognozowaniu poziomów narażenia w wybranych miejscach pracy. Do porównania poziomu narażenia z wartościami dopuszczalnymi wykorzystać można także model EMKG-Expo-Tool [50].

Z kolei program ECETOC TRA (Targeted Risk Assessment – Ukierunkowane Szacowanie Ryzyka) stosowany jest do oceny narażenia na substancje chemiczne dla celów przygotowania oceny bezpieczeństwa chemicznego w ramach sporządzania dokumentacji rejestracyjnej przez Europejską Agencję ds. Chemikaliów (European Chemical Agency – ECHA). Program ten przeznaczony jest przede wszystkim do doboru najbardziej odpowiednich środków prewencji. Na jego bazie została opracowana aplikacja MEASE (Metal's EASE), która wykorzystywana jest do szacowania narażenia na metale i substancje nieorganiczne [57].

Podobnie w celu dobrania najbardziej odpowiednich środków prewencji i sposobów zmniejszenia ryzyka zdrowotnego powstał program Stoffenmanager, który pozwala na szacowanie ekspozycji na pojedyncze substancje i ich mieszaniny z uwzględnieniem konkretnej gałęzi przemysłu [57,58].

Programy ECETOC TRA i Stoffenmanager wykorzystywano w Polsce m.in. do oceny narażenia pracowników służby zdrowia na sewofluran (anestetyk wziewny stosowany podczas zabiegów chirurgicznych) w powietrzu w 117 salach operacyjnych zlokalizowanych w 31 szpitalach [59].

Ponadto modelowanie prognostyczne znalazło zastosowanie do oceny rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym – dotyczy to przede wszystkim poszczególnych frakcji pyłów oraz gazów, głównie tlenków siarki i azotu emitowanych ze źródeł

przemysłowych, np. kominów fabryk czy też środków transportu drogowego [60]. Wśród tego typu modeli wyróżnić można: model pudełkowy, ekstrapolacji trendów, gaussowskie modele smugi, gaussowskie modele obłoków, lagranżowskie modele ruchu pseudocząstek, siatkowe modele eulerowskie, modele receptorowe, na których bazują liczne programy komupterowe, takie jak HBEFA, COPERT, DVG i DRIVE–MODEM, AERMOD [61].

Modelowanie matematyczne (modele gaussowskie kłębu i smugi) wykorzystano także do oceny emisji pyłów $PM_{2,5}$ i PM_{10} generowanych do powietrza podczas pożarów lasów. Dzięki takiemu zastosowaniu modelowania możliwa była pośrednia ocena narażenia strażaków na pyły zawieszone w przyziemnej warstwie powietrza powstającej podczas pożarów [62].

Po 2005 r., ze względu na wprowadzone regulacje prawne dotyczące szkodliwych czynników biologicznych na stanowiskach pracy, poszukuje się skutecznych metod oceny narażenia i ochrony pracowników przed tego rodzaju czynnikami. Podsumowanie kilkunastu dotychczas używanych modeli do prognozowania stężenia bioaerozolu w powietrzu zewnętrznym w pobliżu kompostowni można znaleźć w pracy Douglas i wsp. (2017). Zestawienie to obejmuje głównie modele dyspersyjne w postaci: Pasquill, AUSTAL-PC, SCREEN-3 i ADMS (najczęściej stosowany ADMS - Atmospheric Dispersion Modelling System) wykorzystane do modelowania stężenia pleśni *Aspergillus fumigatus*, promieniowców oraz ogólnej liczby bakterii w powietrzu wokół kompostowni. Autorzy szczegółowo omawiają czynniki brane pod uwagę podczas modelowania rozprzestrzeniania się bioaerozolu w środowisku kompostowni oraz zwracają uwagę na liczne problemy związane z modelowaniem narażenia zdrowotnego na bioaerozol [63].

Na Tajwanie powstał bazujący na wielokrotnej regresji liniowej model predykcyjny do oceny stężenia bakterii i grzybów w budynkach biurowych w Tajpej. Autorzy zaproponowali metodę prognozowania jakości powietrza wewnętrznego z uwzględnieniem licznych parametrów

badanych obiektów – liczby pięter, typu wentylacji powietrza, szybkości wymiany powietrza, potencjalnych źródeł cząstek stałych i gęstości zaludnienia oraz zmiennych określanych wewnątrz i na zewnątrz budynków, takich jak stężenie pyłu $PM_{2,5}$ i $PM_{10,}$ stężenie ditlenku węgla, temperatura i wilgotność względna [64].

Mikrobiologia prognostyczna jest potencjalnie bardzo dobrym narzędziem, które mogłoby wspierać pracodawców w ocenie narażenia na czynniki biologiczne, jak również w doborze środków ochrony indywidualnej. Jednakże obecnie nie ma jeszcze zwalidowanych modeli matematycznych, które można by wykorzystać do tych celów.

Główne przeszkody w konstrukcji modeli matematycznych do oceny narażenia pracowników na bioaerozol to:

- brak ustalonych limitów narażenia zawodowego dla wielu czynników biologicznych,
- brak jasnych korelacji między narażeniem (ilościowym, czasowym) i skutkiem zdrowotnym (zbyt mała liczba badań epidemiologicznych, w tym modelowych testów na zwierzętach),
- duża zmienność ilościowa i jakościowa bioaerozolu w środowiskach pracy,
- trudności z walidacją proponowanych modeli wynikające z różnorodności środowisk pracy [65,66].

Kolejnym wyzwaniem dla mikrobiologii prognostycznej w aspekcie badań nad bioaerozolem jest modelowanie matematyczne przeżywalności mikroorganizmów na materiałach filtracyjnych stosowanych w sprzęcie ochrony układu oddechowego w zależności od parametrów środowiska pracy, co pozwoliłoby na odpowiedni dobór sprzętu do danego miejsca pracy oraz oszacowanie czasu jego bezpiecznego użytkowania (dla sprzętu jednorazowego i wielorazowego użytku) z punktu widzenia mikrobiologicznego.

5.2.4. Modelowanie przeżywalności mikroorganizmów we włókninach filtracyjnych

Dotychczas tylko nieliczne prace badawcze dotyczyły modelowania przeżywalności szkodliwych czynników biologicznych na włókninach filtracyjnych.

Modelowanie prognostyczne stosowano w odniesieniu do skuteczności materiałów filtracyjnych stosowanych w systemach ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji wobec bioaerozolu. Grzybowski [64] opracował model matematyczny do określenia dynamiki zmian stężenia bioaerozolu dostarczanego wraz z powietrzem do pomieszczeń użytkowych w zależności od warunków eksploatacji systemu wentylacyjnego. W modelu tym przyjęto, że cząstki bioaerozolu to jedyne zarodniki wytwarzane przez rozwijające się na podłożu kolonie grzybów strzępkowych. Autor zwrócił uwagę, że modelowanie dynamiki zmian stężenia bioaerozolu w przewodzie wentylacyjnym nie jest zadaniem łatwym ze względu na duże sezonowe wahania składu oraz stężenia mikroorganizmów w powietrzu zewnętrznym oraz zmienne warunki ich depozycji i rozwoju w badanych instalacjach. Zwrócono uwagę, iż zmiana wilgotności powietrza może powodować zarówno przyspieszanie, jak i spowalnianie lub nawet okresowe zahamowanie rozwoju mikroorganizmów, a także intensyfikację zarodnikowaniania pleśni i powstawanie wtórnego bioaerozolu. Skonstruowany model nie uwzględniał także różnorodności gatunkowej mikroorganizmów w powietrzu i zachodzących między nimi interakcji [67].

Inni autorzy, bazując na modelu logistyczym, opracowali model pozwalający na symulację zanieczyszczenia mikrobiologicznego filtrów powietrza o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych. W modelowaniu uwzględniono takie czynniki, jak efektywność filtracji i działania przeciwbakteryjnego, stężenie cząstek pyłu, natężenie przepływu powietrza, ilość składników odżywczych w cząstkach pyłu. Model ten może znaleźć zastosowanie praktyczne do oceny cyklu życia filtrów

wykorzystywanych w systemach ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji, jednakże autorzy wskazują na pewne jego niedoskonałości [68,69].

W ostatnich latach modelowanie prognostyczne wykorzystywano do oceny skuteczności półmasek filtrujących w ochronie przed wirusem grypy typu A (H1N1) czy też do rozprzestrzeniania się wirusa SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome) [68,69]. Reponen i wsp. zbadali w warunkach modelowych możliwość wzrostu i przeżywalność bakterii *Mycobacterium tuberculosis* (prątki gruźlicy) na materiałach filtracyjnych w różnych wariantach warunków symulujących użytkowanie oraz przechowywanie półmasek [70]. Badania tego typu są niezwykle cenne z punktu widzenia epidemiologicznego i pozwalają na szacowanie szybkości szerzenia się epidemii, liczby nowych zachorowań w jednostce czasu oraz monitorowanie rozwoju, przebiegu i zasięgu epidemii na danym terenie. W badaniach epidemiologicznych największe zastosowanie mają modele deterministyczne, stochastyczne oraz sieci społecznych [71].

Zakład Ochron Osobistych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego (CIOP-PIB) i wraz z Instytutem Technologii Fermentacji i Mikrobiologii Politechniki Łódzkiej (ITFIM PŁ) od kilku lat prowadzi badania w zakresie oceny przeżywalności mikroorganizmów na półmaskach filtrujących i materiałach stosowanych do ich konstrukcji w zależności od parametrów środowiska pracy.

Początkowo wykazano, że symulacja oddychania przez półmaskę filtrującą spowodowała, iż poziom wilgotności powietrza wewnątrz materiału filtracyjnego wzrasta do poziomu RH=80-90%, a temperatura do 29-30 °C już po 7 minutach od początku użytkownia. Udowodniono, iż takie wartości wilgotności i temperatury stanowią bardzo dobre warunki do namnażania się mikroorganizmów na materiałach filtracyjnych stosowanych do produkcji sprzętu ochrony układu oddechowego [72]. Co więcej wykazano, że mikroorganizmy mogą namnażać się na materiałach filtracyjnych również w czasie przerw w użytkowaniu, w przypadku stosowania półmasek wielokrotnego użytku. Wyniki badań modelowych potwierdzono w warunkach rzeczywistych, obserwując

biofilm bakteryjny i grzybowy na półmaskach stosowanych przez pracowników elektrociepłowni przetwarzającej biomasę roślinną [72-77]. Natomiast nie wykazano istotnego wpływu rodzaju materiału filtracyjnego (melt-blow, spun-bonded, igłowana) stosowanego w półmaskach na wzrost drobnoustrojów – w przypadku wszystkich rodzajów materiałów wykazano wysoką przeżywalność mikroorganizmów [75].

Stwierdzono także, że przeżywalność mikroorganizmów na materiałach filtracyjnych zależy głównie od rodzaju drobnoustrojów, ich formy fizjologicznej (pojedyncze komórki wegetatywne, formy przetrwalne), postaci (bioaerozol) oraz zdolności do wzrostu biofilmów [77,78]. Ponadto na przykładzie środowiska pracy elektrociepłowni przetwarzającej biomasę roślinną udowodniono, że stężenie pyłu organicznego ma istotne znaczenie w kształtowaniu przeżywalności mikroorganizmów na włókninach filtracyjnych. Modyfikuje on przeżywalność w zależności od rodzaju drobnoustroju – stymuluje wzrost bakterii *E. coli*, hamuje bakterie *S. aureus* i drożdże *C. albicans*, natomiast nie wpływa na pleśnie *A. niger* [73].

Najnowsze badania przeprowadzone przez CIOP-PIB i ITFIM PŁ zmierzały do oceny wpływu parametrów środowiska pracy, tj. zmiennej wilgotności i temperatury, obecności i stężenia organicznego i nieorganicznego pyłu osiadłego, obecności potu (kwaśnego lub zasadowego) oraz obecności biocydu we włókninie na przeżywalność mikroorganizmów na materiałach filtracyjnych używanych do konstrukcji półmasek filtrujących. Po raz pierwszy wykorzystano do tego celu modelowanie matematyczne (model Gompertza).

W badaniu wykorzystano dwa rodzaje polipropylenowych włóknin filtracyjnych: polipropylenową włókninę elektretową wykonaną techniką melt-blown oraz analogiczną włókninę zawierającą dodatkowo biocyd oraz środek pochłaniający wodę. Oba typy zostały wyprodukowane przy użyciu jednoślimakowej wytłaczarki laboratoryjnej ze specjalnie zaprojektowaną głowicą formującą włókna przez rozdmuch stopionego polimeru. Do badań wytypowano 5 gatunków mikroorganizmów pocho-

dzących z Kolekcji Czystych Kultur ATCC (Amerykańska Kolekcja Czystych Kultur) oraz NCAIM (National Collection of Agricultural and Industrial Microorganisms). Były to bakterie: *Bacillus subtilis* NCAIM 01644, *Escherichia coli* ATCC 10536, *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, drożdże *Candida albicans* ATCC 10231 i pleśnie *Aspergillus niger*.

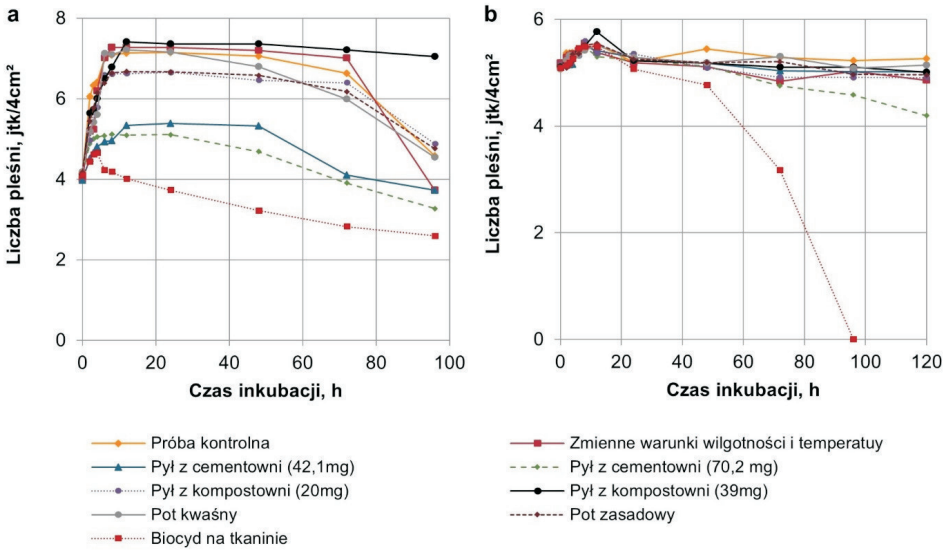
Na włókniny w trakcie badań zostały napylone w komorze pyłowej dwa rodzaje pyłów – organiczny z kompostowni (pobrany w hali homogenizacji odpadów) oraz nieorganiczny z cementowni (z hali przenośnika transportującego klinkier). Nanoszono także świeżo przygotowany (zgodnie z normą PN-EN ISO 105-E04:1996) roztwór potu kwaśnego lub zasadowego [79]. Badania prowadzono w warunkach wilgotności i temperatury symulujących noszenie półmasek filtrujących przez pracowników na stanowiskach pracy z wykorzystaniem metody ilościowej AATCC 100-2004 Antimicrobial Finishes of Textile Materials do analizy przeżywalności mikroorganizmów na włókninach filtracyjnych [80].

Przykładowe wyniki oceny liczby drobnoustrojów w poszczególnych godzinach inkubacji na włókninie filtracyjnej w zależności od badanych czynników przedstawiono na rys. 5.4. Dynamika przeżywalności drobnoustrojów na włókninie filtracyjnej miała typowy przebieg z wyodrębnionymi fazami wzrostu: logarytmiczną, stacjonarną i zamierania.

Modelowanie przeżywalności mikroorganizmów na włókninach wykazało, że czynnikami decydującymi o wysokiej ich przeżywalności są: wilgotność materiału (zapewniona przez obecność wody, a także potu zarówno kwaśnego i zasadowego) oraz obecność pyłu z kompostowni. Natomiast pył z cementowni, szczególnie w wyższym stężeniu (60 mg/4 cm^2) oraz biocyd Sanitized (TH2227, Sanitized AG, 2%) w materiale filtracyjnym istotnie ograniczały przeżywalność testowanych drobnoustrojów: *E. coli, S. aureus, B. subtilis, C. albicans. A. niger* [73].

W badaniach udowodniono przydatność modelu Gompertza do opisu parametrów wzrostu mikroorganizmów i przyrostu liczby ich komórek w materiałach filtracyjnych przeznaczonych do konstrukcji półmasek filtrujących. Model ten zweryfikowano dla rolniczego środowiska pracy,

w którym pracownicy narażeni są na wysokie stężenia roślinnego pyłu organicznego, do oszacowania bezpiecznego czasu stosowania półmasek filtracyjnych. Badania prowadzono w 2 gospodarstwach rolnych na stanowisku operatora kombajnu zbożowego oraz kierowcy ciągnika rolniczego.



Rys. 5.4. Dynamika wzrostu badanych mikroorganizmów w zależności od czynników środowiska; a) *B. subtilis*, b) *A. niger* (źródło: na podstawie [81])

Wykazano, że zanieczyszczenie mikrobiologiczne półmasek filtracyjnych stosowanych w rolniczym środowisku pracy podczas zbioru zbóż (żniw) było bardzo wysokie zarówno dla bakterii, jak i grzybów i wynosiło 10^5 jtk/4 cm^2 (tabela 5.1.).

Podczas użytkowania półmaski przez operatora kombajnu zbożowego liczba bakterii zwiększyła się o 5 rzędów w skali logarytmicznej po 30 min, a grzybów po 60 min. Wykazano, że wzrost liczby mikroorganizmów był proporcjonalny do wzrostu zawartości pyłu na badanych

półmaskach. Na podstawie wykonanych badań uznano, że ze względu na wysoki poziom pyłu emitowanego podczas zbioru zbóż pracujące w takich warunkach osoby powinny stosować jednorazowe półmaski filtrujące i wymieniać je kilka razy podczas pracy [81]. Zastosowanie sprzętu wielokrotnego użytku do ochrony dróg oddechowych pracowników podczas żniw mogłoby stanowić poważne zagrożenie mikrobiologiczne dla ich zdrowia.

Tabela 5.1. Liczba mikroorganizmów i stężenie pyłu na półmasce filtrującej użytkowanej na stanowisku pracy kombajnisty (źródło: na podstawie [81])

Czas po rozpoczęciu pracy [min]	Liczba mikroorganizmów [jtk/4cm^2]		Stężenie pyłu [g]
	Bakterie	Grzyby	
15	$4{,}29 \times 10^4$	$2{,}63 \times 10^4$	0,46705
30	$1{,}20 \times 10^5$	$3{,}63 \times 10^4$	0,50785
60	$1{,}29 \times 10^5$	$2{,}18 \times 10^5$	0,52405
90	$2{,}04 \times 10^5$	$5{,}17 \times 10^4$	0,55625
120	$1{,}18 \times 10^5$	$4{,}13 \times 10^4$	0,6217

Piśmiennictwo

1. Libudzisz Z., Kowal K., Żakowska Z. Mikrobiologia techniczna. Tom 1. Mikroorganizmy i środowiska ich występowania. PWN, Warszawa 2019.
2. Baj J. Mikrobiologia, PWN, Warszawa 2018.
3. Kwaśna H. Mikrobiologia dla studentów uczelni rolniczych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań 2007.
4. Stańkowska D., Kaca W. Systemy komunikacji miedzykomórkowej bakterii Gram-ujemnych i ich znaczenie w ekspresji cech fenotopowych. Post. Microbiol 2005,44: 99-111.
5. Matejczyk M., Suchowierska M. Charakterystyka zjawiska quorum sensing i jego znaczenie w aspekcie formowania i funkcjonowania biofilmu w inżynierii środowiska, budownictwie, medycynie oraz gospodarstwie domowym. Civil and Environmental Engineering / Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2011,2: 71-75.

6. Wu H., Song Z., Givskov M., Doring G., Worlitzsch D., Mathee K., Rygaard J., Hoiby N. Pseudomonas aeruginosa mutations in lasI and rhlI quorum sensing systems result in milder chronic lung infections. Microbiology 2001,147:1 105-1113.

7. Driscoll J.A., Brody S.L., Kollef M.H. The epidemiology, pathogenesis and treatment of Pseudomonas aeruginosa infections. Drugs 2007,67(3): 351-368.

8. Suleman L., Archer D., Cochrane C.A., Percival S.L. Chapter Ten - Healthcare-Associated Infections and Biofilms, Editor(s) [w:] Percival S.L, Williams D.W., Randle J., Cooper T. Biofilms in Infection Prevention and Control, Academic Press, 2014:165-184.

9. Amézquita A., Kan-King-Yu D., Le Marc Y. Modelling microbiological shelf life of foods and beverages [w]: Kilcast D., Subramaniam P. [red.], Food and Beverage Stability and Shelf Life. Woodhead Publishing Limited 2011: 405-458.

10. Pyrzyńska E. Prognozowanie mikrobiologiczne w łańcuchu dostaw [w:] Popović M., Błaszczyk M. (red.) Innowacyjne rozwiązania biznesowe IV. Tom 2: Innowacyjna gospodarka, Łódź 2011.

11. Esser D.S., Leveau J.H.J., Meyer K.M. Modeling microbial growth and dynamics. Applied Microbiology and Biotechnology 2015,99:8831-8846.

12. Fakruddin Md., Mazumder R.M., Mannan K.S.B. Predictive microbiology: Modeling microbial responses in food, Ceylon Journal of Science (Bio. Sci.) 2011,40(2): 121-131.

13. Łobacz A., Kowalik J., Ziajka S., Kopeć M. Porównanie i walidacja prognozowanego i obserwowanego tempa wzrostu Listeria monocytogenes w mleku pasteryzowanym i UHT, Med. Wet. 2008,64: 80-84.

14. Steinka I. Nowe trendy w prognozowaniu bezpieczeństwa żywności. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni 2011,68 :47-56.

15. Tarczyńska A.S., Kowalik J., Łobacz A. Modelowanie mikrobiologicznego bezpieczeństwa żywności. Przem. Spoż 2012,66: 35-37.

16. Kręgiel D., Oberman H. Prognozowanie bioprocesów. Mikrobiologia prognostyczna w przemyśle piwowarskim, Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny 2004,1: 12-14.

17. Ratkowsky D.A. Principles of nonlinear regression modeling. J. Ind. Microbiol. 1993,12: 195-199.

18. Shimoni E., Labuza T. Modeling pathogen growth in meat products: future challenges, Trends in Food Science and Technology 2000, 11: 394-402.

19. Juneja V.K., Marks H.M. Predictive models for growth of Clostridium perfringens during cooling of cooked cured chicken. Journal of Food Microbiology 2002,19: 313-327.

20. Meekin T. Predictive microbiology: Quantitative science delivering quantifiable benefits to the meat industry and other food industries. Meat science 2007,77: 17-27.

21. Buchanan R.L. Predictive food microbiology. Trends Food Sci. Technol. 1993;4: 1-6.

22. Zubeldia B.B., Jimenez M.N., Claros M.T.V., Andres J.L.M., Martin-Olmedo P. Effectiveness of the cold chain control procedure in retail sector in Southern Spain, Food Control 2016,59: 614-618.

23. Buchanan R.L. Food Safety Assessment Amer. Chem. Soc., Washington DC 1993.

24. Kołożyn-Krajewska D. Ogólne zasady prognozowania w mikrobiologii żywności. Cz. I. Matematyczne modelowania wzrostu mikroorganizmów w żywności. Przemysł Spożywczy 1995,49(11): 362.

25. Baranyi J. Roberts T.A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food, Int. J. Food Microbiol 1994,23: 277-294.

26. Labuza T. P. Belina D., Diez F. Prediction for shelf life and safety of minimally processed CAP/MAP chilled foods, Journal of Food Protection 1992,55(9): 741-750.

27. Ross T., McMeekin T.A. Predictive microbiology. Int. J. Food Microbiol 1994,23:(3-4): 241-264.

28. Ross T., Sumner J. A simple, spreadsheet-based, food safety risk assessment tool. International Journal of Food Microbiology 2002,77: 39-53.

29. Scott R.B., Tan T.D.M. Specific effect of infection and malnutrition on intestinal longitudinal smooth muscle response in Yersinia enterocolitica enteritis in rabbit, Departament of Pediatrics and Gastroenterology Research Group University of Calgary Calgary, Alberta Canada 1990.

30. Hong Y.K., Huang L., Yoon Y.B. Mathematical modeling and growth kinetics of Clostridium sporogenes in cooked beef. Food Control 2016,60: 471-477.

31. Jeppesen V.F., Huss H.H. Antagonistic activity of lactic acid bacteria against Listeria monocytogenes and Yersinia enerocolitica in a model fish product at 5 ºC. International Journal of Food Microbiology 1993,19(3): 179-86.

32. Luo K., Hong S. S., Oh D.H. Modeling the effect of storage temperatures on the growth of Listeria monocytogenes on redy-to-eat ham and sausage. Journal of food protection 2015;78: 1675-1681.

33. Devlieghere F., Geeraerd A.H., Versyck K.J., Bernaert H., Impe J.F., Debevere J. Growth of Aeromonas hydrophila in modified – atmosphere packed cooked meat products. Journal of Food Microbiology 2000,17: 185-196.

34. Psomas A.N., Nychasa G-J., Haroutounianb S.A., Skandamis P.N. Development and validation of a tertiary simulation model for predicting the growth of the food microorganisms under dynamic and static temperature conditions. Computers and Electronics in Agriculture 2011;76: 119-129.

35. Brown M., Stringen M. Microbiological risk assessment in food processing. Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2002.

36. Szczawiński J. Mikrobiologia prognostyczna - zastosowania praktyczne. Med. Weter. 2012,68(9): 540-543.

37. Whiting R.C. Microbial modeling in foods. Food Sci. Nutr. 1995,35: 467-494.

38. Tadeusiewicz R. Neural networks in mining sciences – general overview and some representative examples. Arch. Min. Sci. 2015,60(4): 971-984.

39. Stęgowski Z. Sztuczne sieci neuronowe. Kernel 2004,1:16-19.

40. Najjar Y., Basheer I., Hajmeer, M. Computational neural networks for predictive microbiology, 1. Methodology Int. J. Food Microbiol. 1997,34: 27-49.

41. Shene C., Andrews B., Asenjo J. A. Optimization of Bacillus subtilis fedbatch fermentation for the maximization of the synthesis of a recombinant β-l ,4-endoglucanase. Computer Applications in Biotechnology 1998,7: 219-223.

42. Cai Y-D, Chou K-C. Using neural network for prediction of subcellular location of prokaryotic and eukaryotic proteins. Molec. Cell Biol. Res. Communic 2000,4: 172-173.

43. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on the new mode of determining the value of life contingencies. Philos. Trans. R. Soc. Lond. 1825,115: 513-585.

44. Berry, G.J., Cawood, R.J., Flood, R.G. Curve fitting of germination data using the Richards function, Plant Cell Environ. 1988,11: 183-188.

45. Hanusz Z., Siarkowski Z., Ostrowski K. Zastosowanie modelu Gompertza w inżynierii rolniczej. Inżynieria Rolnicza 2008,7,105.

46. Ranal, M.A., de Santana, D.G. How and why to measure the germination process? Rev. Brasil. Bot. 2006,29:1-11.

47. Coyne J.M., Matilainen K., Berry D.P., Sevon-Aimonen M.L., Mäntysaari E.A., Juga J., Serenius T., McHugh N. Estimation of Genetic (Co)Variances of Gompertz Growth Function Parameters in Pigs. J Anim Breed Genet 2017,134(2): 136-143.

48. Phukoetphim N., Salakkam A., Laopaiboon P., Laopaiboon L. Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: Logistic and modified Gompertz models. Journal of Biotechnology 2017,243: 69-75.

49. Majeed Z., Mansor N., Ismail S., Mathialagan R., Man Z. Gompertz Kinetics of Soil Microbial Biomass in Response to Lignin Reinforcing of Urea-Crosslinked Starch Films. Procedia Engineering 2016,148: 553-560.

50. Chatterjee T., Chatterjee B.K., Majumdar D., Chakrabarti P. Antibacterial effect of silver nanoparticles and the modeling of bacterial growth kinetics using a modified Gompertz model. BBA - General Subjects 2015,1850: 299-306.

51. Liu H., Chen N., Feng C., Tong S., Li R. Impact of electro-stimulation on denitrifying bacterial growth and analysis of bacterial growth kinetics using a modified Gompertz model in a bio-electrochemical denitrification reactor. Bioresource Technology 2017,232: 344-353.

52. Nguyen, D.D., Chang S.W., Jeong S.Y., Jeung J., Kim S., Guo W., Ngo H.H. Dry thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of food waste: Performance evaluation, modified Gompertz model analysis, and energy balance. Energy Conversion and Management 2016,128: 203-210.

53. Varini E., Rotondi R. Probability distribution of the waiting time in the stress release model: the Gompertz distribution. Environmental & Ecological Statistics 2015,22(3): 493-511.

54. Knochel S., Gould G. (). Preservation microbiology and safety: Quo vadis? Trends in Foods and Technology 1995,6:1 27-131.

55. Whiting R.C., Buchanan R.L. Predictive Modeling [w:] Doyle M.P., Beuchat L.R, Montville T.J. (red.). Food Microbiology, Foundamentals and Frontiers, ASM Press, Washington D.C. 1997.

56. Fu B., Taoukis P.S., Labuza T.P. Predictive microbiology for monitoring spoilage ofdairy products with time – temperature integrators. J. Food Sci. 1991,56:1 209-1215.

57. Fryer M., Collins C.D., Ferrier H., Colvile R.N., Nieuwenhuijsen M.J. Human exposure modelling for chemical risk assessment: a review of current approaches and research and policy implications. Environmental Science & Policy 2006,9(3): 261-274.

58. Gromiec J.P., Kupczewska-Dobecka M., Jankowska A., Czerczak S. Bezpomiarowa ocena narażenia zawodowego na substancje chemiczne –

nowe wyzwanie dla pracodawców. Medycyna Pracy 2013,64(5): 699-716.

59. Jankowska A., Czerczak S., Kucharska M., Wesołowski W., Maciaszek P., Kupczewska-Dobecka M. Application of predictive models for estimation of health care workers exposure to sevoflurane, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2015,21(4): 471-479.

60. Mazur A., Bartnicki J., Zwoździak J. Modele transportu aerozoli atmosferycznych w ocenie środowiskowego zagrożenia. Medycyna Środowiskowa - Environmental Medicine 2014,17(1): 7-15.

61. Łobucki L. Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza. Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2003.

62. Jędraszko S., Matusiak M., Mazurek M. Modelowanie zasięgu rozprzestrzeniania się niebezpiecznych zanieczyszczeń pyłowych PM2,5 i PM10 w powietrzu generowanych podczas pożarów lasów. Mechanik 2015,10: 4-11.

63. Tseng, C.-H., Wang, H.-C., Xiao, N.-Y., Chang, Y.-M. Examining the feasibility of prediction models by monitoring data and management data for bioaerosols inside office buildings. Building and Environment. 2011,46(12): 2578-2589.

64. Grzybowski P. Modelowanie poziomu stężenia bioaerozolu w centralnym systemie wentylacyjnym, Inż. Ap. Chem. 2010,49(4): 24-25.

65. Eduard W., Heederik D., Duchaine C., Green B.J. Bioaerosol exposure assessment in the workplace: the past, present and recent advances. J Environ Monit. 2012,14(2): 334-339.

66. Douglas P., Hayes E.T., Williams W.B., Tyrrel S.F., Kinnersley R.P., Walsh K., O'Driscoll M., Longhurst P.J., Pollard S.J.T., Drew G.H. Use of dispersion modelling for environmental impact assessment of biological air pollution from composting: Progress, problems and prospects. Waste Manag. 2017,70: 22-29.

67. Joe Y.H., Yoon K.Y., Hwang J. Methodology for modeling the microbial contamination of air filters. PLoS ONE 2014,9(2): e88514.

68. Yi L., Fengzhi L., Qingyong Z. Numerical simulation of virus diffusion in facemask turing breathing cycles. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005,48: 4229-4242.

69. Tracht S.M., Del Valle S.Y., Hyman J.M. Mathematical modeling of the effectiveness of facemasks in reducing the spread of novel influenza A (H1N1). PLoS ONE 2010,5(2): e9018.

70. Reponen T., Wang Z., Willeke K., Grinshpun S. Survival of Mycobacteria on N95 Personal Respirators. Infection Control & Hospital Epidemiology 1999,20(4) :237-241.

71. Hurst C.J. Modeling the Transmission and Prevention of Infectious Disease. Cham, Switzerland, Springer 2017.

72. Majchrzycka K., Okrasa M., Skóra J., Gutarowska B. Evaluation of the survivability of microorganisms deposited on filtering respiratory protective devices under varying conditions of humidity. International Journal of Environmental Research and Public Health 2016,13:98.

73. Majchrzycka K., Okrasa M., Szulc J., Gutarowska B. The impact of dust in filter materials of respiratory protective devices on the microorganisms viability. International Journal of Industrial Ergonomics 2017,58:109-116.

74. Majchrzycka K., Okrasa M., Skóra J., Gutarowska, B. Evaluation of the survivability of microorganisms deposited on filtering respiratory protective devices under varying conditions of humidity. International Journal of Environmental Research and Public Health 2016,13: 98.

75. Majchrzycka K., Okrasa M., Jachowicz A., Szulc J., Gutarowska, B. Microbial growth on dust loaded filtering materials used for the protection of respiratory tract as a factor affecting filtration efficiency. International Journal of Environmental Research and Public Health 2018,15: 1902.

76. Szulc J., Otlewska A., Okrasa M., Majchrzycka K., Sulyok M., & Gutarowska B. Microbiological contamination at workplaces in a combined heat and power (CHP) station processing plant biomass. International Journal of Environmental Research and Public Health 2017,14, 99.

77. Majchrzycka K., Gutarowska, B. Brochocka A. Aspects of tests assessment of filtering materials used for respiratory protection against bioaerozol. Part I – type of active substance, contact time, microorganism species. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2010,16: 263-273.

78. Majchrzycka K., Gutarowska B., Brochocka A. Aspects of tests assessment of filtering materials used for respiratory protection against bioaerozol. Part II– sweat in environment, microorganisms in the form of bioaerozol. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2010,16: 275-280.

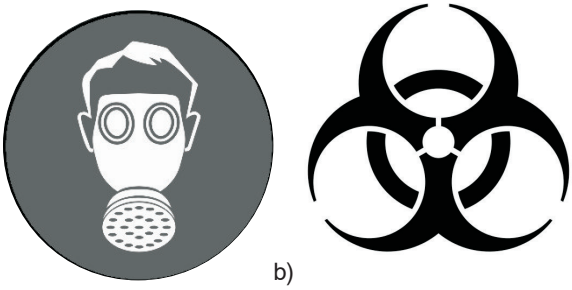
79. PN-EN ISO 105-E04:1996 Tekstylia. Badania odporności wybarwień. Odporność wybarwień na działanie potu.

80. AATCC Test Method 100-2004 Antimicrobial Finishes on Textile Materials: Assessment of Antimicrobial Finishes on Textile Materials, Technical Manual/2010.2004.

81. Jachowicz A., Majchrzycka K., Szulc J., Okrasa M., Gutarowska B. Survival of Microorganisms on Filtering Respiratory Protective Devices Used at Agricultural Facilities. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019,16,2819.

6. Wskazówki praktyczne dla użytkowników i producentów sprzętu ochrony układu oddechowego

Użytkowanie sprzętu ochrony układu oddechowego powinno być nadzorowane. Specjalne oznakowanie obszarów (rys. 6.1.), w których stosowanie sprzętu jest obowiązkowe, może stanowić w tym zakresie ogromną pomoc, jednak zawsze trzeba pamiętać o wyraźnym zdefiniowaniu granic tych stref.



a) b)

Rys. 6.1. Znaki: a) nakazu stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego, b) występowania zagrożeń czynnikami biologicznymi (źródło: a – http://www.public-domainfiles.com/show_file.php?id=13928522411723, b – https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Biohazard_symbol.svg)

Jednocześnie, biorąc pod uwagę specyfikę czynników biologicznych, których cechą charakterystyczną jest możliwość szybkiego przenoszenia się i rozprzestrzeniania (np. w służbie zdrowia każdego pacjenta trzeba traktować jako osobę przenoszącą czynnik biologiczny potencjalnie zakaźny), należy zawsze zakładać, że zagrożenie biologiczne może się pojawić także poza strefą oznaczoną jako niebezpieczna. Warto podkreślić, że w razie narażenia na szkodliwe czynniki biologiczne przenoszone drogą powietrzną wszyscy pracownicy, w tym kadra kierownicza i inspekcyjna, przebywając w strefie oddziaływania tych czynników, powinni stosować sprzęt ochrony układu oddechowego. Miejsce składowania sprzętu powinno być oznakowane i łatwo dostępne.

Opracowany przez pracodawcę system zarządzania bezpieczeństwem stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego powinien obejmować, co najmniej, zagadnienia związane z:

- doborem rodzaju i klasy ochronnej sprzętu,
- uwzględnieniem ergonomii i stanu zdrowia pracowników,
- określeniem warunków stosowania sprzętu, w tym czasu stosowania,
- opracowaniem i zapewnieniem odpowiednich warunków przechowywania i utylizacji,
- szkoleniem pracowników.

Istotną rolę w systemie zapewnienia bezpieczeństwa pracownikom narażonym na szkodliwe czynniki biologiczne odgrywają szkolenia. Powinny one być prowadzone przed przystąpieniem pracownika do pracy i okresowo powtarzane, szczególnie gdy następują zmiany w procedurach zwiazanych z bezpieczeństwem i ochroną zdrowia. Szkolenia odbywają się na koszt pracodawcy. Podczas spotkań z pracownikami konieczne jest poinformowanie ich – co najmniej – o:

- potencjalnym ryzyku dla zdrowia związanym z narażeniem na szkodliwe czynniki biologiczne,
- środkach ostrożności, jakie przewidział pracodawca, a pracownik powinien stosować w celu zapobieżenia narażeniu,
- wymaganiach higieny,
- noszeniu i stosowaniu środków ochrony indywidualnej, w tym ich prawidłowym kompletowaniu, dopasowywaniu, czasie bezpiecznego stosowania, dezynfekcji, przechowywaniu i utylizacji,
- sposobie postępowania w przypadku wystąpienia wypadku lub zdarzenia prawie wypadkowego.

Niezależnie od prowadzonych szkoleń pracodawca powinien opracować dla pracowników stosujących sprzęt ochrony układu oddechowego przed szkodliwym bioaerozolem proste wskazówki w formie graficznej. Powinny być one udostępnione pracownikom np. w formie plakatów umieszczonych w widocznym miejscu. Może to być np. pomieszcze-

nie, w którym pracownik pobiera sprzęt przed przystąpieniem do pracy lub pomieszczenia sanitarne i socjalne, przeznaczone na wypoczynek i spożywanie posiłków. Przykład takiego plakatu ze wskazówkami dla pracowników pokazano na rys. 6.2.

Rys. 6.2. Plakat promujący zasady bezpiecznego użytkowania sprzętu ochrony układu oddechowego przed szkodliwym bioaerozolem (źródło: własne CIOP-PIB)

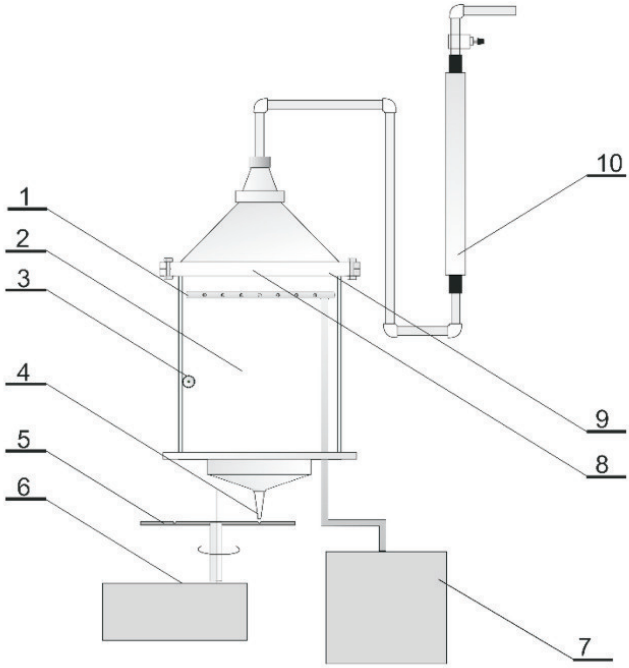
6.1. Zalecenia odnośnie do oceny sprzętu i informacji producenta

Pracodawca, oprócz dostarczenia pracownikowi odpowiednich ŚOI, powinien określić warunki i czas ich stosowania oraz sposób przechowywania i konserwacji. Niezbędnym elementem systemu bezpieczeństwa powinno być przeprowadzenie przez pracodawcę odpowiednich szkoleń i pokazów zakładania i dopasowywania ŚOI. W celu prawidłowego wypełnienia tych zobowiązań pracodawca korzysta w znacznej mierze z instrukcji/informacji producenta ŚOI. Dlatego też dobrze przygotowana przez producenta instrukcja zwiększa atrakcyjność oferty handlowej sprzętu na rynku bhp. W przypadku sprzętu ochrony układu oddechowego, który jest zalecany przez producenta do stosowania przed szkodliwymi czynnikami biologicznymi, szczególnie istotne dla pracodawcy są informacje o czasie namnażania się mikroorganizmów w materiale filtracyjnym.

Aby producent sprzętu ochrony układu oddechowego mógł dostarczyć pracodawcom informacji pozwalających określić czas stosowania sprzętu, możliwe jest przeprowadzenie w Zakładzie Ochron Osobistych CIOP-PIB w Łodzi badań laboratoryjnych próbek materiałów filtracyjnych, stanowiących materiał konstrukcyjny półmasek, ze wskazaniem, jakie warunki środowiska pracy będą sprzyjały rozwojowi mikroorganizmów w tym materiale. Informacje o wynikach tych badań producent może umieścić w swojej instrukcji wraz z rekomendacją, że sprzęt ten jest szczególnie przeznaczony do stosowania w środowisku szkodliwych bioaerozoli. Zapisu tego nie można wprowadzić do instrukcji producenta na podstawie standardowych badań.

Celem badań jest wyznaczanie wskaźnika przeżywania mikroorganizmów w zapylonych materiałach filtracyjnych stosowanych w sprzęcie ochrony układu oddechowego.

Do badań symulacji zjawisk zachodzących w materiałach filtracyjnych podczas ich stosowania w środowisku szkodliwych bioaerozoli stosuje się stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Schemat stanowiska do napylania włóknin filtracyjnych; 1 – dysze układu nawilżania, 2 – komora pyłowa, 3 – higrometr, 4 – dysza ssąca, 5 – podajnik pyłu, 6 – silnik obracający podajnik pyłu, 7 – nawilżacz, 8 – uchwyt pomiarowy do mocowania próbek, 9 – pokrywa komory, 10 – rotametr (źródło: własne CIOP-PIB)

Zasadniczą część komory pyłowej stanowi cylindryczny zbiornik wykonany z przezroczystego tworzywa, co umożliwia obserwację sposobu przepływu aerozolu i sedymentacji cząstek pyłu, przez cały czas prowadzenia obładowywania pyłem. Badaną próbkę włókniny filtracyjnej mocuje się w uchwycie pomiarowym o średnicy 80 mm, w górnej części komory pyłowej, w odległości 200 mm od wlotu aerozolu. Uchwyt pomiarowy stanowi zaadoptowany łącznik gwintowy stosowany w częściach twarzowych sprzętu ochrony układu oddechowego, dodatkowo wyposażony w uszczelkę, zapewniającą szczelność połączenia. Za próbką w odległości 100 mm umieszcza się filtr absolutny, którego zadaniem jest zbieranie cząstek pyłu, przechodzących przez próbkę badaną.

W dolnej części komory zainstalowano stożkową dyszę ssącą o długości 100 mm i średnicy zmieniającej się od 4 do 30 mm. Jako generator aerozolu stosuje się tarczowy podajnik pyłu, umożliwiający powstawanie aerozolu poprzez zasysanie pyłu z tarczy strumieniem powietrza z określonym objętościowym natężeniem przepływu. Stężenie zapylenia w ośrodku pomiarowym reguluje się poprzez zmiany prędkości obrotowej tarczy i objętości powietrza zasysanego przez dyszę.

W komorze pyłowej zainstalowano układ umożliwiający pomiar stężenia zapylenia metodą depozycyjną, składający się z uchwytu filtra mierniczego, połączonego poprzez rotametr z pompą ssącą. Ten sam układ zasysający wymusza przepływ aerozolu pyłowego przez badaną próbkę.

Poprzez podłączenie nawilżacza ultradźwiękowego do komory pyłowej stworzono warunki do prowadzenia pomiarów przy wilgotności względnej ośrodka od 50% do 100%. Warunki mikroklimatu monitoruje się higrometrem elektronicznym, wyposażonym w sondę pomiarową, zabezpieczoną filtrem siatkowym przed wnikaniem aglomerujących cząstek pyłu. Sondę higrometru umieszcza się wewnątrz komory pyłowej, w przestrzeni pod badaną próbką, co umożliwia ciągłe monitorowanie wilgotności powietrza w ośrodku pomiarowym.

Zawartość pyłu w próbce materiału filtracyjnego (Dp) oblicza się według wzoru:

$$Dp=(m_p/m_m)\times 100\%, \qquad (6.1.)$$

gdzie m_p jest masą naniesionego pyłu, natomiasy m_m masą próbki materiału filtracyjnego [g].

Do badań przeżywalności mikroorganizmów używa się próbek o powierzchni 4 cm^2 pobranych w sterylnych warunkach z napylonych próbek materiałów filtracyjnych.

Badania przeżywalności można prowadzić z wykorzystaniem mikroorganizmów modelowych wytypowanych na podstawie analizy śro-

dowiska pracy. Przeżywalność mikroorganizmów należy ocenić po 24 godzinach inkubacji w warunkach temperatury T=28±2 °C i wilgotności względnej powietrza RH=80%. Założoną zawartość wilgoci w próbkach uzyskuje się poprzez dodawanie odpowiedniej objętości 0,85% NaCl oraz inokulum drobnoustrojów zawieszonych w 0,85% NaCl. W celu ustalenia liczby początkowej mikroorganizmów należy pobrać próbki w czasie 0 h. Oznaczenie przeżywalności mikroorganizmów w napylonych materiałach filtracyjnych wykonuje się metodą AATCC 100-2004.

Współczynnik przeżywalności drobnoustrojów na materiale filtracyjnym w każdej godzinie inkubacji (S) należy wyznaczyć według wzoru:

$$S=(N_t/N_0)\times 100\%, \qquad (6.2.)$$

gdzie N_0 oznacza liczbę drobnoustrojów obecną na materiale filtracyjnym w czasie t=0 h, natomiast N_t liczbę drobnoustrojów na materiale filtracyjnym po określonym czasie inkubacji wynoszącym t=8, 24, 48, 72,120 h [jtk/próbkę].

Procedurę symulacji zjawisk zachodzących w materiałach filtracyjnych podczas ich stosowania w środowisku szkodliwych bioaerozoli stosuje się do prowadzenia badań dla producentów sprzętu ochrony układu oddechowego w celu uszczegółowienia zapisów w instrukcji producenta, na etapie badania typu oraz podczas kontroli jakości materiałów filtracyjnych.

Może być ona także wykorzystana przez pracodawców do określenia czasu stosowania konkretnego, używanego przez pracowników sprzętu, przy symulacji warunków środowiska pracy. Pozwoli to na uściślenie procedur stosowania sprzętu, ze szczególnym uwzględnieniem czasu jego bezpiecznego stosowania.

Wykorzystanie opisanej metody przedstawiono na przykładzie badań z użyciem dwóch rodzajów pyłów. Pyłu o wysokim zanieczyszczeniu mikrobiologicznym pobranego z kompostowni oraz pyłu o niskim zanieczyszczeniu mikrobiologicznym z cementowni. Charakterystykę pyłów przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Charakterystyka pyłów stosowanych do oceny przeżywalności mikroorganizmów w w zapylonych materiałach filtracyjnych

Opis	Skład (%)					C:N
	C	N	P	H	S	
pył z cementowni pobrany w hali przenośnika transportującego klinkier	1,50	0,14	0,01	1,40	0,01	10,71
pył z kompostowni pobrany w hali homogenizacji odpadów	58,20	0,59	0,18	5,40	0,02	98,64

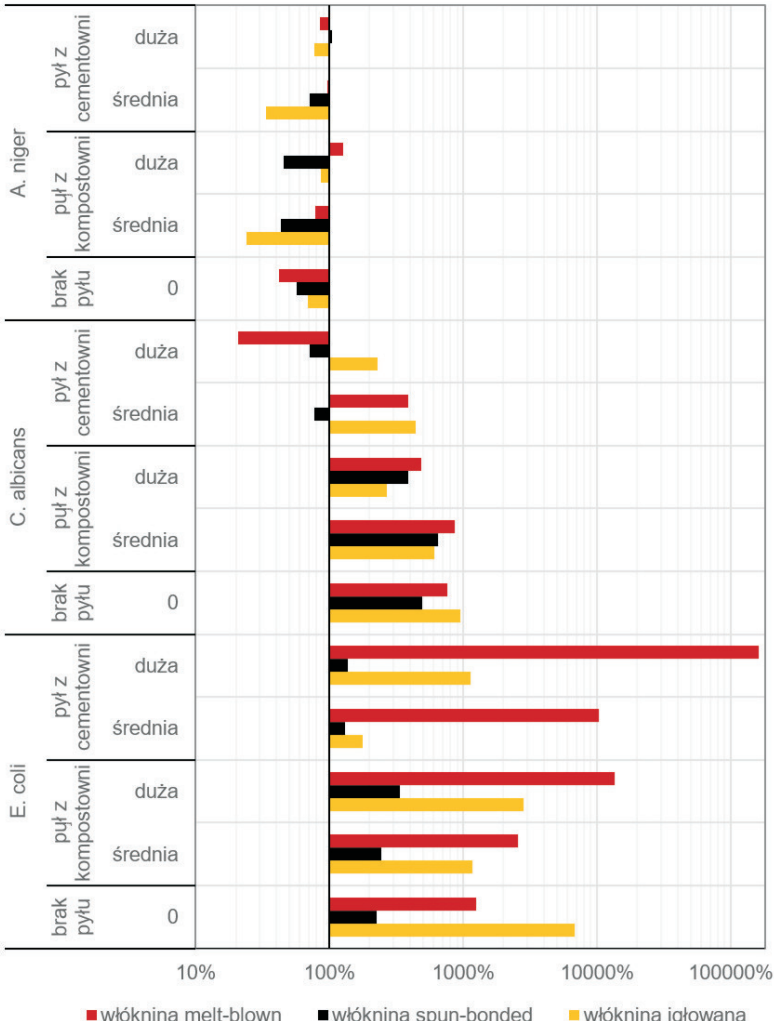
Badaniom poddano trzy typy polipropylenowych włóknin filtracyjnych stosowanych do konstrukcji sprzętu ochrony układu oddechowego:

- elektretową włókninę filtracyjną wykonaną techniką melt blown,
- włókninę osłonową wykonaną techniką spun-bonded,
- igłowaną i kalandrowaną włókninę konstrukcyjną (sztywnikową).

Do oceny przeżywalności mikroorganizmów na włókninach filtracyjnych wykorzystano mikroorganizmy przechowywane w Kolekcji Czystych Kultur ŁOCK 105 Instytutu Technologii Fermentacji i Mikrobiologii: bakterie *Escherichia coli* (ATCC 10536), drożdże *Candida albicans* (ATCC 10231) oraz pleśnie *Aspergillus niger* (ATCC 16404).

Na rys. 6.4. przedstawiono przykładowe wyniki badania przeżywalności mikroorganizmów na włókninach w obecności pyłu z kompostowni i cementowni o różnych stężeniach.

Na zapylonych włókninach filtracyjnych obserwowano przeżywanie wszystkich badanych mikroorganizmów. Intensywność przeżywania zależała od rodzaju włókniny. Przeżywalność mikroorganizmów na badanych włókninach w obecności różnych pyłów była największa dla bakterii: *E.coli* (N=132% -16055%), niższa dla drożdży *C.albicans* (N=21% - 952%), najniższa dla pleśni *A.niger* (N=24% - 128%). Obserwowano zwiększenie przeżywalność bakterii *E.coli* i pleśni *A.niger* wraz z podwyższeniem stężenia pyłu. Obecność pyłu nie zwiększyła przeżywalności drożdży *C.albicans*, co więcej pył z cementowni zmniejszył istotnie przeżywalność drożdży na badanych włókninach.



Rys. 6.4. Przeżywalność mikroorganizmów na włókninach filtracyjnych

Przykładowo na podstawie przedstawionych wyżej wyników badań producent może w instrukcji użytkowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego wprowadzić następujące zapisy:

„Sprzęt przeznaczony jest do ochrony układu oddechowego przed wszelkimi aerozolami, ze szczególnym uwzględnieniem bioaerozoli.

W przypadku pracy na stanowisku, gdzie występują szkodliwe bakterie, może dojść do szybkiego ich namnażania się w materiale filtracyjnym, co będzie stanowić dodatkowe źródło zagrożenia dla pracownika. Namnażanie się bakterii będzie potęgowane przez wzrost wilgoci w materiale filtracyjnym oraz nagromadzony pył, szczególnie gdy jest on bogaty w związki węgla (powyżej 50%).

W związku z tym zaleca się wymianę sprzętu po każdorazowej przerwie w jego stosowaniu. Podczas zdejmowania i zakładania sprzętu należy zachować szczególną ostrożność, np. stosować dla poprawy bezpieczeństwa jednorazowe niesterylne rękawice. Konieczne jest dokładne mycie rąk po każdym kontakcie ze sprzętem (np. po jego dopasowaniu).

Filtrujący sprzęt ochrony układu oddechowego nie może być stosowany przez kilku użytkowników. Rekomendowane jest przechowywanie sprzętu, w przerwach pomiędzy kolejnym użyciem, w papierowych pojemnikach w warunkach niskiej wilgotności powietrza (poniżej 50%).”

6.2. Czas bezpiecznego stosowania sprzętu i zasady przechowywania i konserwacji

W myśl postanowień rozporządzenia MPiPS o ogólnych przepisach bhp to pracodawca jest odpowiedzialny za ustalenie bezpiecznych warunków stosowania środków ochrony indywidualnej, a w szczególności czasu ich użytkowania przez pracowników do momentu, w którym sprzęt traci walory ochronne i powinien być wymieniony na nowy.

Czas bezpiecznego użytkowania sprzętu powinien być określony na podstawie analizy typu sprzętu filtrującego, który jest stosowany przez pracowników, ich czynności zawodowych oraz warunków środowiska pracy, tj. wilgotności, temperatury oraz przynależności mikroorganizmów do grupy zagrożenia. W ochronie pracowników przed bioaerozolem na podkreślenie zasługuje problem wielokrotnego użytkowania filtrów i półmasek filtrujących, w wyniku czego może dojść do

szybkiego namnażania się mikroorganizmów zgromadzonych w materiale filtracyjnym.

Stosowanie klasycznego (nie biobójczego) sprzętu ochrony układu oddechowego do ochrony pracowników narażonych na wdychanie szkodliwego bioaerozolu może być postrzegane jako nieprawidłowy dobór sprzętu do warunków panujących na stanowiskach pracy. W szczególności wynika to z wymagania, że sprzęt sam z siebie nie może stanowić dodatkowego źródła zagrożenia. Brak świadomości pracodawców co do zjawisk zachodzących w filtrującym sprzęcie ochrony układu oddechowego podczas jego stosowania w środowisku szkodliwych bioaerozoli może prowadzić do niespełnienia tego wymagania. Dla pracownika oznacza to brak właściwego sposobu ochrony przed zagrożeniami w środowisku pracy, a ponadto stwarza możliwość przeniesienia i rozprzestrzenienia czynników infekcyjnych do pozazawodowego środowiska.

W celu przeciwdziałania zagrożeniom dla użytkownika wynikającym z możliwości rozwoju mikroorganizmów w materiałach filtracyjnych sprzętu stosowanego do ochrony przed bioaerozolem pracodawcy powinni:

- poszukiwać na rynku sprzętu ochrony układu oddechowego o cechach biobójczych,
- opracować specjalne procedury postępowania ze sprzętem podczas wykonywania czynności zawodowych i przerw w pracy, a także określić czas użytkowania zależny od warunków środowiska pracy – w przypadku stosowania standardowego sprzętu ochrony układu oddechowego przed czynnikami chemicznymi.

Limity czasu użytkowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego w dużym stopniu zależą od środowiska pracy. W przypadku stanowisk przemysłowych oraz rolnictwa, gdzie nośnikiem czynników biologicznych jest pył organiczny, z reguły dochodzi do szybkiej redukcji powierzchni filtracyjnej w wyniku wychwytywania przez włókna

cząstek zanieczyszczeń ze strumienia przepływającego powietrza. W wyniku tego zjawiska gwałtownie rosną opory oddychania, co utrudnia pracownikom wykonywanie normalnych czynności zawodowych. Temu zjawisku sprzyja podwyższona wilgotność powietrza wewnątrz półmaski przy intensywnej pracy oraz wilgotny mikroklimat środowiska pracy. W razie braku możliwości natychmiastowej wymiany sprzętu na egzemplarz wolny od pyłu najprawdopodobniej pracownik zdejmie sprzęt lub będzie robił częste przerwy w pracy. Szacując czas stosowania sprzętu na tych stanowiskach pracy, należy także wziąć pod uwagę fakt, że sprzęt o najwyższej klasie ochronnej (P3) najszybciej ulegnie zatkaniu.

Z inną sytuacją mamy do czynienia w przypadku sprzętu ochrony układu oddechowego stosowanego w zakładach opieki zdrowotnej i laboratoriach diagnostycznych, gdzie większym problemem jest zmienność czynników biologicznych i częste przerwy w stosowaniu sprzętu związane z czynnościami zawodowymi. Można wyróżnić dwa przypadki. Pierwszy zachodzi wtedy, kiedy sprzęt ochrony układu oddechowego jest noszony bez zdejmowania, ale pracownik przemieszcza się pomiędzy pomieszczeniami lub ma kontakt z różnymi pacjentami. Drugi przypadek występuje, gdy pracownik zdejmuje sprzęt po każdym kontakcie z pacjentem lub po wykonaniu analizy materiału będącego nośnikiem szkodliwych czynników biologicznych. Dla pracowników jednostek opieki zdrowotnej ważne jest, aby do ich ochrony stosować sprzęt ochrony układu oddechowego spełniający wymagania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2016/425, a nie wyrób medyczny, który jest przeznaczony do ochrony pacjenta.

Aby zapobiec rozprzestrzenianiu się infekcji, należy stosować sprzęt o cechach biobójczych lub opracować reguły limitowanego użycia sprzętu standardowego. Pracodawca powinien określić zasady dotyczące krotności jego użycia, biorąc pod uwagę długość czasu wykonywania jednej czynności zawodowej i przerw w stosowaniu sprzętu oraz rodzaj mikroorganizmów i ich zdolność do przeżywania oraz namnażania się w danym środowisku.

Opracowując zasady bezpiecznego stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego, który nie ma właściwości biobójczych, należy rozważyć zminimalizowanie możliwości rozprzestrzenienia się czynników biologicznych przez:

- przekazanie sprzętu do utylizacji po każdorazowym wykonywaniu czynności związanych z wytworzeniem szkodliwego bioaerozolu,
- przekazanie sprzętu do utylizacji, gdy zostanie zanieczyszczony krwią lub innymi płynami fizjologicznymi,
- przekazanie sprzętu do utylizacji po bezpośrednim kontakcie z pacjentem będącym źródłem infekcji wymagającej szczególnych środków ostrożności,
- zastosowanie dodatkowo do sprzętu ochrony układu oddechowego osłony twarzy, jeśli spowoduje to zmniejszenie zanieczyszczenia mikroorganizmami powierzchni filtracyjnej sprzętu,
- przechowywanie sprzętu wielokrotnego użytku, w przerwach pomiędzy stosowaniem, w przeznaczonym do tego celu pomieszczeniu, w papierowym, przepuszczającym powietrze pojemniku,
- uniemożliwienie, w przypadku sprzętu wielokrotnego użytku, w przerwach pomiędzy jego stosowaniem, kontaktu innych osób niż użytkownik z zanieczyszczoną powierzchnią sprzętu, np. przez wprowadzenie kodów identyfikujących sprzęt, oraz uniemożliwienie dostępu osobom nieuprawnionym do pomieszczenia, w którym jest przechowywany,
- regularne czyszczenie pojemników (innych niż papierowe) do przechowywania sprzętu podczas przerw w pracy lub zastosowanie pojemników do jednorazowego użytku,
- mycie rąk z użyciem wody i mydła lub środków dezynfekujących na bazie alkoholi przed dotykaniem i po dotykaniu sprzętu podczas jego zakładania, zdejmowania lub dopasowywania,
- unikanie dotykania wewnętrznej strony sprzętu; w tym celu można użyć jednorazowych niesterylnych rękawic ochronnych, które należy wyrzucić po czynnościach związanych z zakładaniem, zdejmowaniem lub dopasowywaniem sprzętu.

Aby zapewnić pracownikom bezpieczne stosowanie filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego przed szkodliwym bioaerozolem, pracodawca powinien opracować w formie pisemnej proste procedury dotyczące:

- sposobu prawidłowego zakładania i zdejmowania sprzętu oraz jego prawidłowego dopasowania i sprawdzania tego dopasowania w prosty sposób, zgodnie z instrukcją producenta (przykład na rys. 6.5.),
- maksymalnej krotności ponownego użycia sprzętu przeznaczonego do wielokrotnego użytku (np. dla półmasek filtrujących wielokrotnego użytku rekomendowana krotność użycia tego samego egzemplarza nie powinna być większa niż 5),
- zaprzestania stosowania sprzętu, który ma oznaki zniszczenia lub opór oddychania w nim stanowi dużą uciążliwość podczas wykonywania normalnych czynności zawodowych,
- sposobu przechowywania sprzętu wielokrotnego pomiędzy kolejnym użyciem,
- ostrzeżenia, że sprzęt ochrony układu oddechowego nie może być stosowany przez kilku użytkowników i dlatego, w celu uniknięcia pomyłki, taki sprzęt i pojemnik, w którym jest przechowywany w przerwach pomiędzy kolejnym użyciem, powinien być oznakowany w sposób jednoznaczny, trwały i czytelny.

1.

Umieścić część twarzową tak, aby przykrywała usta i nos lub całą twarz (w zależności od części twarzowej).

2.

Założyć nagłowie tak, aby jego dwie oddzielne taśmy znajdowały się na czubku głowy i na karku.

3.

Dopasować naciąg taśm nagłowia tak, aby część twarzowa była utrzymywana w ustalonym położeniu.

4.

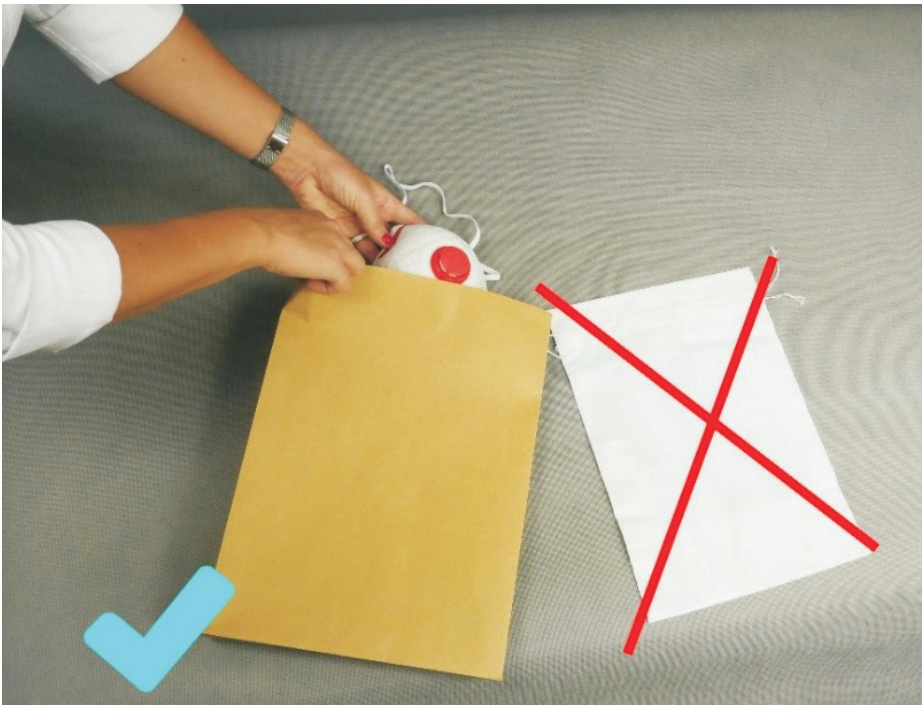
W przypadku półmasek filtrujących dopasować uszczelkę nosową.

5.

W celu zdjęcia części twarzowej należy poluzować taśmy nagłowia, np. przez zwolnienie zaczepów.

Rys. 6.5. Prawidłowe zakładanie i zdejmowanie półmaski (źródło: własne CIOP-PIB)

Sprzęt ochrony układu oddechowego powinien być odpowiednio przechowywany po zakończeniu użytkowania, w specjalnie do tego celu przeznaczonym miejscu/pojemniku, np. jednorazowym, jednakże nigdy w szczelnym opakowaniu, np. foliowym, gdyż sprzyja to rozwojowi mikroorganizmów wewnątrz włóknin filtracyjnych (rys. 6.6.).



Rys. 6.6. Przykładowy sposób przechowywania sprzętu ochrony układu oddechowego (źródło: własne CIOP-PIB)

Ważny jest też mikroklimat pomieszczenia, w którym przechowuje się sprzęt – wilgotność powyżej 60% oraz temperatura powyżej 25 °C sprzyjają rozwojowi i przeżywaniu mikroorganizmów.

Zasadą jest, że sprzęt ochrony układu oddechowego jest przeznaczony do użytku osobistego. Jednakże w przypadku sprzętu ze wspomaganiem lub z wymuszonym przepływem powietrza ze względów ekonomicznych mogą wystąpić okoliczności powodujące, że dany

sprzęt jest noszony przez więcej niż jedną osobę. Wówczas pracodawca powinien wdrożyć specjalne procedury czyszczenia i dezynfekcji w celu zapewnienia, aby takie użytkowanie nie stwarzało jakichkolwiek problemów zdrowotnych lub higienicznych różnym użytkownikom. Sprzęt wielokrotnego użycia powinien być utrzymywany w czystości i odpowiednio dezynfekowany zgodnie z instrukcją dostarczoną przez producenta (rys. 6.7.).

Rys. 6.7. Przykładowy sposób dezynfekcji sprzętu (źródło: własne CIOP-PIB)

Pracodawca powinien opracować zalecenia dla pracowników co do wymiany sprzętu na nowy i okresowo zorganizować kontrolę przestrzegania tych zasad przez pracowników. Przydatnym dla pracodawcy narzędziem zapewniającym kontrolę przestrzegania zasad bezpiecznego stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego może być sporządzenie listy kontrolnej. Przykład takiej listy przedstawiono na rys. 6.8.

Lista kontrolna

Ocena bezpieczeństwa stosowania
sprzętu ochrony układu oddechowego (SOUO)
przed szkodliwym bioaerozolem

Narażenie na szkodliwe bioaerozole

- Czy SOUO jest odpowiednio dobrany do poziomu ryzyka zawodowego i warunków stanowiska pracy? ☐
- Czy zastosowanie SOUO nie spowoduje zwiększenia poziomu ryzyka zawodowego (np. na skutek możliwości rozwoju mikroorganizmów we włókninie filtracyjnej)? ☐

Ergonomia i stan zdrowia

- Czy SOUO jest odpowiednio dopasowany do pracownika, po wykonaniu niezbędnych regulacji? ☐
- Czy stosowany SOUO nie wpływa negatywnie na stan zdrowia pracownika, np. nie wywołuje alergii? ☐
- Czy podczas pracy w SOUO występują problemy z pokonaniem zbyt dużego oporu oddychania? ☐

Warunki stosowania sprzętu

- Czy określono warunki stosowania środków ochrony indywidualnej w przypadku ich wielokrotnego użycia? ☐
- Czy określono czas, po którym pracownik powinien wymienić SOUO na nowy egzemplarz? ☐
- Czy w razie konieczności stosowania innych środków ochrony indywidualnej, oprócz SOUO, istnieje możliwość ich wzajemnego dopasowania bez zmniejszania poziomu parametrów ochronnych (np. zastosowanie półmaski filtrującej może uniemożliwić dopasowanie gogli ochronnych)? ☐

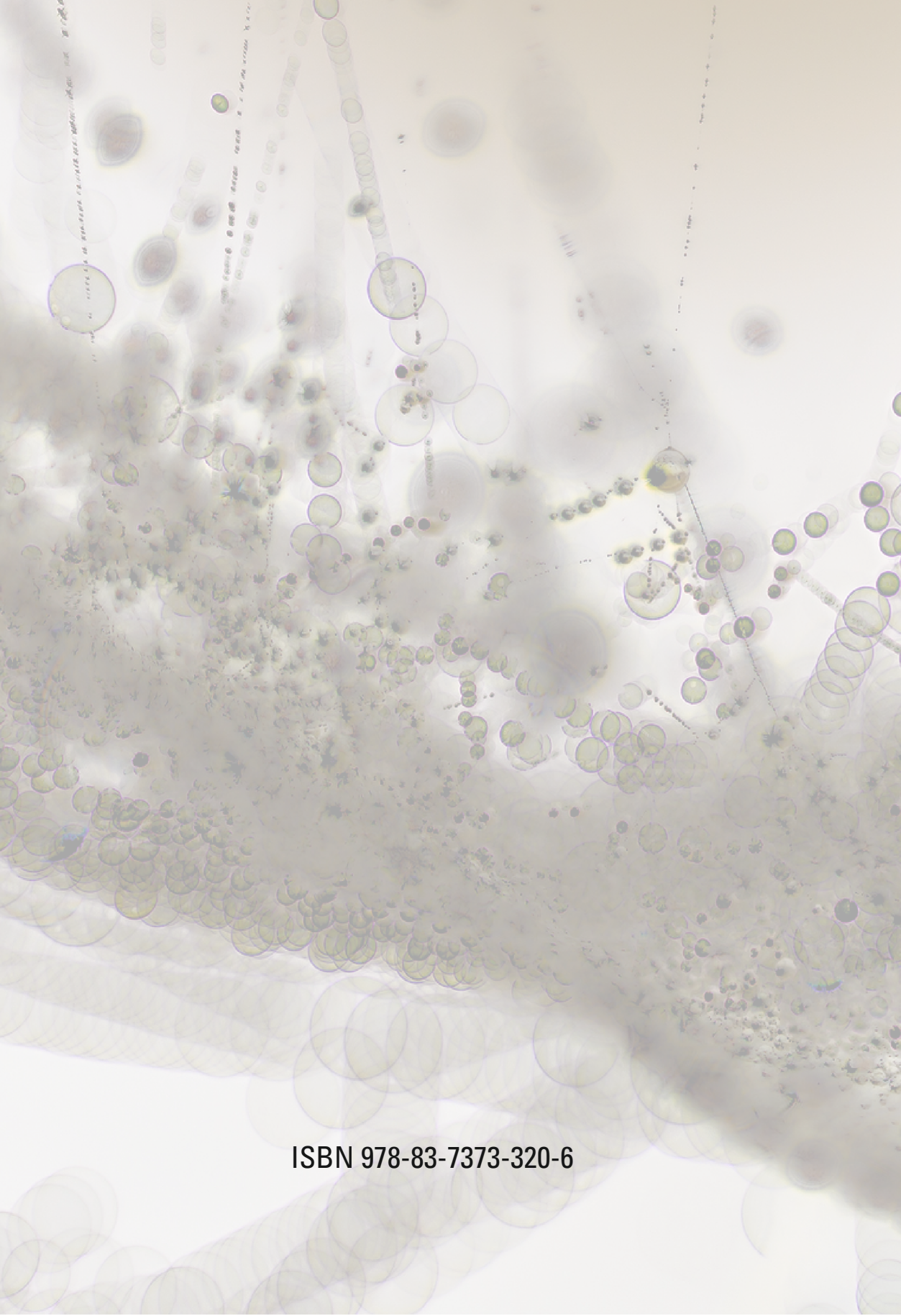
Warunki techniczne do przechowywania sprzętu i jego utylizacji

- Czy zapewniono właściwe miejsce do przechowywania sprzętu wielokrotnego użycia w czasie jego stosowania przez pracowników? ☐
- Czy została opracowana i wdrożona procedura utylizacji SOUO po jego zużyciu przez pracowników? ☐

Szkolenie i system zarządzania stosowaniem sprzętu

- Czy zostało przeprowadzone szkolenie dla pracowników dotyczące prawidłowego stosowania, dopasowywania oraz zasad wielokrotnego użycia SOUO, a także czasu, po którym należy wymienić SOUO na nowy? ☐
- Czy pracownicy zostali poinformowani i praktycznie przeszkoleni co do sposobu czyszczenia i dezynfekcji SOUO wielokrotnego użycia? ☐
- Czy oznakowano miejsce, gdzie konieczne jest stosowanie SOUO? ☐
- Czy został opracowany sposób zbierania i analizy zgłaszanych przez pracowników problemów dotyczących ograniczenia możliwości wykonywania czynności zawodowych na skutek stosowania SOUO (np. ograniczenia pola widzenia, braku możliwości stosowania okularów korekcyjnych)? ☐
- Czy opracowano sposób kontroli i analizy przestrzegania przez pracowników zasad stosowania SOUO, ze szczególnym uwzględnieniem wielokrotnego użycia? ☐

Rys. 6.8 Lista kontrolna do oceny bezpieczeństwa stosowania sprzętu ochrony układu oddechowego przed bioaerozolem m (źródło: własne CIOP-PIB)



ISBN 978-83-7373-320-6