

Ocena skuteczności różnych typów urządzeń przeznaczonych do oczyszczania powietrza w zakresie redukcji bakterii i grzybów w powietrzu wewnętrznym w warunkach rzeczywistych

Evaluation of the efficiency of different types of air purification devices in scope of reducing the total number of bacteria and fungi in indoor air in real conditions

MACIEJ SZCZOTKO, IZABELA ORYCH, ŁUKASZ MAKA, JOLANTA SOLECKA

DOI 10.36119/15.2023.1.3

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań skuteczności działania trzech typów urządzeń służących do oczyszczania powietrza w zakresie redukcji ogólnej liczby bakterii i ogólnej liczby grzybów. Badane urządzenia wykorzystywały następujące technologie oczyszczania: Urządzenie A - generator zimnej plazmy oraz filtrację mechaniczną powietrza, Urządzenie B - wieloetapową filtrację mechaniczną oraz proces fotokatalizy, Urządzenie C - przepływową lampę UV-C i filtrację przez filtr węglowy. Ogólną liczbę mikroorganizmów przed włączeniem urządzeń, w trakcie ich pracy oraz po wyłączeniu oznaczono za pomocą metody zderzeniowej. Wszystkie analizy prowadzono w warunkach rzeczywistych - dla jednego z urządzeń była to sala wstępnej intensywnej terapii na oddziale szpitalnego oddziału ratunkowego, dla dwóch pozostałych pomieszczenia biurowe. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono m.in., że skuteczność oczyszczaczy powietrza w zakresie redukcji ogólnej liczby bakterii i grzybów zbadana w warunkach rzeczywistych była niższa niż skuteczność deklarowana przez producentów oczyszczaczy. Zastosowanie oczyszczaczy powietrza do poprawy jego mikrobiologicznej jakości wewnątrz pomieszczeń powinno być każdorazowo poprzedzone odpowiednim doбором urządzenia z uwzględnieniem parametrów pomieszczenia docelowego oraz liczby osób w nim przebywających.

Słowa kluczowe: powietrze wewnątrz pomieszczeń, bakterie w powietrzu, grzyby w powietrzu, oczyszczacze powietrza, mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza wewnętrznego

This article presents results of research on the effectiveness of three types of air purification devices in scope of reducing the total number of bacteria and the total number of fungi. The tested devices used the following purification technologies: Device A - cold plasma generator and mechanical air filtration, Device B - multi-stage mechanical filtration and photocatalysis process, Device C - UV-C flow lamp with carbon filter. The total number of bacteria and fungi in air samples was determined using impact method. The measurements were performed before the devices started to work, during air purification and after the end of the process. The analyzes were carried out in real conditions: one device was used in a pre-Intensive Care Unit room at the Accident and Emergency hospital department, the two others were tested in office rooms. Obtained results show, that the effectiveness of air purifiers in reduction of the total number of bacteria and fungi tested in real conditions was lower than the effectiveness declared by purifier manufacturers. The use of air purifiers to improve indoors air microbiological quality should always be preceded by the appropriate selection of the device. It should take into account the parameters of the target room and the number of people staying in it.

Keywords: indoor air, airborne bacteria, airborne fungi, air purifiers, microbial air contamination

Wstęp

Bakterie unoszące się w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w postaci różnego rodzaju bioaerozoli od lat stanowią przysuszczały, a w niektórych przypadkach

potwierdzony czynnik powodujący wiele chorób zakaźnych. Pośrednio są one też powiązane z rozwojem i/lub zaostrzeniem przewlekłych chorób układu oddechowego, w tym astmy [1-8]. Problem dotyczy głównie krajów uprzemysłowionych oraz obszarów

infrastruktury miejskiej w krajach rozwijających się, gdzie ludzie spędzają około 85% doby w przestrzeni wewnątrz pomieszczeń [9, 10, 11].

Należy podkreślić, że na jakość powietrza wewnętrznego mają wpływ zarówno

dr Maciej Szczotko, <https://orcid.org/0000-0001-7740-5768>; mgr Izabela Orych, <https://orcid.org/0000-0003-3693-0923>; dr Łukasz Mąka, <https://orcid.org/0000-0001-6392-9747>; dr hab. Jolanta Solecka prof. NIZP PZH - PIB, <https://orcid.org/0000-0002-6052-3423> – Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego PZH – Państwowy Instytut Badawczy Zakład Bezpieczeństwa Zdrowotnego Środowiska. Adres do korespondencji / Corresponding author: mszczotko@pzh.gov.pl.

zanieczyszczenia występujące wewnątrz pomieszczeń jak i pochodzące ze środowiska zewnętrznego. Powietrze atmosferyczne może zawierać zanieczyszczenia fizyczne, chemiczne oraz biologiczne, natomiast biorąc pod uwagę zanieczyszczenia generowane wewnątrz budynków warto zauważyć, że na jakość powietrza, oprócz aktywności bytowej samego człowieka, mają wpływ także materiały konstrukcyjne, wykończeniowe oraz wyposażenie pomieszczeń i emitowane przez nie zanieczyszczenia [12, 13]. W kontekście zanieczyszczeń mikrobiologicznych szczególnie istotne są obiekty, w których stwierdzono tzw. zespół chorego budynku (ang. sick building syndrome, SBS) [14]. Zapewnianie odpowiedniej jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń coraz częściej staje się priorytetem i głównym determinantem zdrowia osób, które w nich przebywają. Wśród mikroorganizmów obecnych w powietrzu znajdować się mogą wirusy, komórki lub fragmenty komórek bakterii, fragmenty grzybnicy i zarodniki grzybów [15-18]. Jednym z głównych źródeł bioaerozoli bakteryjnych w pomieszczeniach jest człowiek, który naturalnie emituje bakterie stanowiące m.in. mikroflorę skóry oraz znajdujące się również we włosach czy na odzieży. Wytwarzanie aerozolu wodno-powietrznego może odbywać się poprzez kichanie, kaszel, a także standardową aktywność bytową (ruch, przemieszczanie się, mówienie) ludzi. W przeciwieństwie do aerozolu bakteryjnego, podstawowym źródłem grzybów występujących w powietrzu pomieszczeń jest powietrze atmosferyczne, które w różny sposób przenika do wnętrza budynków. Do znaczących wewnętrznych źródeł bioaerozoli zalicza się również zwierzęta domowe i rośliny [19, 20].

Wzrost świadomości społeczeństwa na temat zagrożeń związanych z nieodpowiednią jakością mikrobiologiczną powietrza wewnątrz budynków coraz częściej wymusza różnorodne działania zmierzające do jego poprawy. Wśród nich wyróżnić należy kontrolę i eliminację bądź ograniczenie źródeł zanieczyszczenia [21], poprawę wydajności systemu wentylacyjnego [22, 23] oraz zastosowanie technologii mających na celu oczyszczanie powietrza bezpośrednio wewnątrz pomieszczeń lub na różnych etapach jego uzdatniania w ramach systemów wentylacyjno-klimatyzacyjnych [13, 24-26].

W ostatnich latach szczególną popularność zyskały różnego rodzaju urządzenia mające na celu oczyszczanie powietrza wewnątrz pomieszczeń. Wg danych ich producentów mają one zastosowanie zarówno w celu usuwania bądź redukcji liczby cząstek stałych – głównie o średnicach pomiędzy 2,5 i 10 μm , zanieczyszczeń che-

micznych, takich jak lotne związki organiczne (VOC) czy ozon, a także redukcji drobnoustrojów występujących w powietrzu wewnątrz pomieszczeń [27]. Wśród różnorodnych rozwiązań technologicznych oferowanych obecnie na rynku wyróżnić należy:

Urządzenia działające na zasadzie filtracji mechanicznej

Ich działanie polega na oczyszczaniu powietrza poprzez usuwanie zawieszonych w nim cząstek stałych. Skuteczność procesu filtracji zależy głównie od klasy zastosowanego filtra powietrza. Wśród czynników, które mają znaczący wpływ na skuteczność działania tego rodzaju filtrów zalicza się wielkość, rodzaj i kształt cząstek wyłapywanych przez materiał filtracyjny, a także rozmiar i rodzaj usieciowania włókien filtracyjnych, prędkość przepływu powietrza, jego wilgotność i temperatura [28]. W miarę eksploatacji wszystkie filtry mechaniczne tracą swoją skuteczność w zakresie redukcji liczby cząstek zawieszonych w powietrzu w wyniku akumulacji dużej ich liczby wewnątrz swojej struktury. Powoduje to również redukcję wartości ciśnienia, zmniejszenie przepływu powietrza przez matrycę filtra oraz stwarza ryzyko powstania wtórnego źródła mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza wewnątrz pomieszczeń [29, 30].

Urządzenia wykorzystujące generatory zimnej plazmy

Ich działanie polega na zastosowaniu plazmy, silnie zjonizowanego gazu wytwarzanego w wyniku wyładowań elektrycznych (np. koronowych) wysokiego napięcia, składającego się z elektronów, jonów dodatnich i cząstek obojętnych (cząsteczek atomów) [31]. Posiada ona właściwości pozwalające na wytrącanie cząstek w wyniku zjawisk elektrostatycznych, wytwarza promieniowanie UV, a tym samym sprzyja utlenianiu cząstek oraz usuwaniu cząstek wirusów i komórek bakterii i innych drobnoustrojów [13, 32-34]. Mechanizm dezaktywacji drobnoustrojów nie został jednak do końca przebadany [35]. Ponadto sam proces generuje też wolne rodniki i inne utleniacze, które powodują zrywanie wiązań chemicznych i rozkład substancji, takich jak lotne związki organiczne, do CO_2 i H_2O [36, 37].

Urządzenia wykorzystujące procesy fotokatalizacyjne

Jednym z najbardziej znanych i najczęściej stosowanych fotokatalizatorów jest dwutlenek tytanu (TiO_2), zwłaszcza w formie nanocząsteczkowej. Światło ultrafioletowe (UV) padające na nanocząstki powoduje, że na powierzchni TiO_2 powstają wolne elektrony, które łącząc się z tlenem z powietrza

tworzą jego aktywne formy oraz dziury elektronowe. Te z kolei po połączeniu z parą wodną oraz wodą tworzą rodniki wodorotlenowe. Powstające rodniki wodorotlenowe posiadają bardzo silne właściwości utleniające, dzięki czemu mogą przyczynić się do reakcji rozkładu różnego rodzaju zanieczyszczeń organicznych, takich jak lotne związki organiczne (VOC), oleje, tłuszcze, spaliny samochodowe, wonne i bezwonne gazy, a także redukować liczbę drobnoustrojów obecnych w powietrzu wewnątrz pomieszczeń [38, 39]. Największymi problemami związanymi z zastosowaniem procesów fotokatalizacyjnych jest wytwarzanie szkodliwych dla zdrowia produktów ubocznych jak formaldehyd czy acetaldehyd, konieczność zastosowania lamp UV, co może powodować dodatkową emisję ozonu wewnątrz pomieszczeń oraz ograniczona żywotność fotokatalizatora [40-42]. Istotny jest też sam fakt potencjalnego negatywnego wpływu nanocząstek wykorzystywanych w procesie fotokatalizy na zdrowie ludzi [43].

Urządzenia działające na zasadzie promieniowania UV

Procesy dezynfekcji z wykorzystaniem promieniowania UV stosuje się powszechnie od szpitali i placówek opieki zdrowotnej po centra handlowe, obiekty biurowe, szkolno-wychowawczy, mieszkalne i środki transportu zbiorowego [44-46]. Niestety producenci lub dystrybutorzy w celach marketingowych zamieszczają w folderach reklamowych wątpliwe i pozbawione podstaw naukowych twierdzenia dotyczące skuteczności działania poszczególnych urządzeń, która w znacznej większości jest zawyżana [47]. W procesie promieniowania wykorzystywane jest najczęściej widmo fali UV między 200 a 280 nm, tak zwane widmo UV-C [48]. Powoduje ono krytyczne uszkodzenia genomu drobnoustrojów uniemożliwiając im właściwą replikację DNA czy RNA, a w efekcie znacząco zmniejsza ich przeżywalność. Dlatego wpływ promieniowania UV na drobnoustroje nazywany jest prawidłowo ich „inaktywacją”, a nie „zabijaniem”. Problemem związanym z zastosowaniem tego typu oczyszczaczy powietrza jest też uwalnianie do powietrza ozonu (w zależności od widma fali UV) i wolnych rodników tlenowych [47, 49, 50].

Urządzenia działające na zasadzie filtracji elektrostatycznej

Łącząc procesy elektrostatyczne, filtrację mechaniczną, a do tego w większości są przystosowane do okresowego ich czyszczenia oraz mycia. Mechanizm działania opiera się na wykorzystaniu silnego pola elektrycznego, zjawiska wyładowania koronowego jonizującego

powietrze oraz przyciągania elektrostatycznego natładowanych cząstek. Cząstki unoszące się w powietrzu są przyciągane i wychwytywane przez ładunek statyczny, podczas gdy powietrze przepływa przez usieciowaną strukturę włókien filtra podanych na ładunki elektrostatyczne. W zależności od zastosowanej mocy jonizacji i typów filtra, skuteczność filtracji za pomocą filtrów elektrostatycznych szacowana jest w zakresie od 82% do 94% [10]. Wadą tego rodzaju rozwiązania jest fakt, że sposób działania filtrów elektrostatycznych wymusza silną jonizację cząstek, a to wiąże się bezpośrednio z emisją ozonu (O₃) oraz tlenku azotu (NO_x) [11]. Oba związki, jako szkodliwe dla zdrowia człowieka, są powszechnie uznawane za zanieczyszczenia powietrza wewnątrz pomieszczeń. Filtry tego rodzaju stosowane są najczęściej jako jeden z połączonych etapów oczyszczania powietrza w urządzeniach stosowanych w tym celu, np. w połączeniu z filtracją mechaniczną lub procesami opartymi o zjawisko fotokatalizy [51, 52].

Dostępne dane literaturowe skupiają się głównie na testach prototypów oczyszczaczy, które są przeprowadzane w komorach testowych o małej kubaturze (1 - 2 m³), co nie odzwierciedla rzeczywistych wymiarów i warunków panujących w pomieszczeniach mieszkalnych lub biurowych. Ponadto wewnątrz komór testowych nie są stosowane stałe źródła emisji mikroorganizmów, imitujące obecność ludzi, co ma miejsce w rzeczywistych warunkach stosowania urządzeń przeznaczonych do oczyszczania powietrza [53, 54].

W ulotkach reklamowych producenci i dystrybutorzy oczyszczaczy powietrza często podają wartość skuteczności usuwania danej grupy zanieczyszczeń na poziomie nawet 99,99%, co jest zabiegiem czysto marketingowym. Biorąc pod uwagę sporne kwestie dotyczące potwierdzenia skutecznego działania różnego rodzaju oczyszczaczy powietrza w zakresie redukcji liczby drobnoustrojów w powietrzu w warunkach rzeczywistych, a także brakiem jednoznacznej rekomendacji w zakresie powszechnego stosowania takich urządzeń, autorzy podjęli się próby weryfikacji skutecznego działania trzech rodzajów oczyszczaczy powietrza w warunkach rzeczywistych, w odniesieniu do danych deklarowanych przez ich producentów.

Materiały i metody

W niniejszej pracy wykorzystano wyniki pomiarów stężenia ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu pomieszczenia szpitalnego oddziału ratunkowego oraz pomieszczeń biurowych. Badania wykonano przez

pracowników Zakładu Bezpieczeństwa Zdrowotnego Środowiska NIZP PZH-PIB w latach 2019-2020.

Aparatura pomiarowa:

1. DUO SAS Super 360

Do pobrania próbek powietrza wewnątrz pomieszczeń zastosowano automatyczny próbnik powietrza DUO SAS Super 360 (International PBI Spa Mediolan, Włochy). Aspirator działał na zasadzie metody zderzeniowej.

Próbnik wyposażony był w dwie perforowane głowice wykonane ze stali nierdzewnej AISI 316, posiadające 401 otworów każda. Zakres pracy urządzenia obejmował natężenie przepływu powietrza do 360 dm³/min.

Ze względu na możliwość wystąpienia błędów w obliczeniach powstałych w wyniku aspiracji kilku mikroorganizmów przez ten sam otwór w perforowanej głowicy próbnika powietrza, zastosowano korektę wyniku końcowego przy użyciu wzoru *Fellera*:

$$Pr = N \left[\frac{1}{N} + \frac{1}{(N-1)} + \frac{1}{(N-2)} + \dots + \frac{1}{(N-r+1)} \right]$$

Pr – wynik po korekcji,

N – liczba otworów w głowicy aparatu,

r – liczba kolonii na płycie.

Powietrze o różnych objętościach ulegało osadzeniu na powierzchni płytek Petriego o średnicy 90 mm z pożywkami mikrobiologicznymi.

2. Termohigrometr

Do pomiarów temperatury oraz wilgotności powietrza podczas prowadzonych badań zastosowano termohigrometr Meteo Digit III (Lambrechti) wyposażony w sondę HygroClip-S o dokładności pomiaru temperatury ±0,3°C (przy 23°C) i zakresie od -40°C do +85°C oraz dokładności pomiaru wilgotności powietrza ±1,5% r.H. (przy 23°C) i zakresie od 0 do 100% r.H.

3. Miernik dwutlenku węgla

Do pomiarów stężenia CO₂ w pomieszczeniach podczas prowadzonych badań zastosowano wielofunkcyjny miernik AZ77535 (AZ Instruments) o zakresie pomiarowym od 0 ppm do 5000 ppm CO₂ i dokładności pomiaru 30 ppm ±5% wartości odczytu.

Aparatura pomiarowa wykorzystana do badań podlegała sprawdzeniu oraz wzorcowaniu w autoryzowanych jednostkach, zgodnie z harmonogramem przyjętym w laboratorium.

Podłoża mikrobiologiczne:

Tryptone soy agar (TSA) firmy Oxoid (nr katalogowy: PO0163) – do oznaczania ogólnej liczby bakterii w powietrzu.

Malt extract agar (MEA) firmy Oxoid (nr katalogowy: CM0059) – do oznaczania ogólnej liczby grzybów w powietrzu.

Metodyka badania:

Badanie wykonywano zgodnie z akredytowaną (PCA – Polish Centre for Accreditation) Procedurą badawczą PB-01-LHK/M ed. 4 z dnia 30.04.2012 r. Oznaczanie ilościowe mikroorganizmów (bakterii, grzybów) metodą zderzeniową.

Przy każdym pomiarze zarówno bakterie jak i grzyby osadzano na płytkach w dwóch seriach pomiarowych dla objętości wynoszących odpowiednio 100 i 300 litrów. Każda seria pomiarowa obejmowała 5 pomiarów.

Płytki Petriego z podłożem TSA i osadzonymi mikroorganizmami inkubowano w temperaturze 30°C ± 1°C w celu określenia ogólnej liczby bakterii. Kolonie bakterii liczone po 48 godzinach inkubacji. Płytki Petriego z podłożem MEA i osadzonymi mikroorganizmami inkubowano w temperaturze 25°C ± 1°C w celu określenia ogólnej liczby grzybów. Kolonie grzybów liczone trzykrotnie, odpowiednio po 48 h, po 72 h i po 96 h godzinach inkubacji.

Opis warunków prowadzenia badań skuteczności urządzeń do oczyszczania powietrza wewnątrz pomieszczeń:

1. Urządzenie A - stosujące generator zimnej plazmy oraz filtrację mechaniczną powietrza

Wolnostojące urządzenie mobilne zaopatrzone w generator zimnej plazmy oraz trzystopniowy mechanizm filtracji powietrza. Wydajność urządzenia w zakresie przepływu powietrza, w zależności od poziomu nastawy, wynosiła od 181 m³/h do 906 m³/h. Badanie prowadzone było przy nastawie urządzenia na poziomie III, tj. 453 m³/h.

Do badań wytypowano salę wstępnej intensywnej terapii w oddziale szpitalnego oddziału ratunkowego w jednym z warszawskich szpitali. Sala była użytkowana przez personel medyczny oraz pacjentów w trybie ciągłym (24h). Po wykonaniu pomiaru t0 zwiększyła się liczba przebywającego w pomieszczeniu personelu medycznego. Od początku wykonywania badań w pomieszczeniu przebywały również cztery osoby uczestniczące w pomiarach. Sala posiadała stałe połączenie z innym pomieszczeniem (punkt pielęgniarstwa), bez możliwości zamknięcia drzwi pomiędzy tymi obszarami. Powierzchnia pomieszczenia wynosiła około 50 m² przy wysokości około 3,30 m. Sala zaopatrzona była w wentylację grawitacyjną. Okna przez cały okres prowadzenia

badania były zamknięte. Przeprowadzono siedem pomiarów czystości mikrobiologicznej powietrza w odstępach 1h każdy, gdzie:

- t0 = pomiar godzinę przed uruchomieniem urządzenia;
- t1 = pomiar bezpośrednio przed uruchomieniem urządzenia;
- t2 = pomiar godzinę po włączeniu urządzenia;
- t3 = pomiar dwie godziny po włączeniu urządzenia;
- t4 = pomiar trzy godziny po włączeniu urządzenia;
- t5 = pomiar cztery godziny po włączeniu urządzenia;
- t6 = pomiar godzinę po wyłączeniu urządzenia.

2. Urządzenie B - stosujące wieloetapową filtrację mechaniczną oraz proces fotokatalizy

Wolnostojące urządzenie mobilne wyposażone w dwustopniową filtrację mechaniczną oraz złożo fotokatalizacyjne zbudowane lampą UV. Wydajność urządzenia wynosiła od 250 m³/h do 1200 m³/h i regulowana była automatycznie w zależności od zanieczyszczenia powietrza wewnątrz pomieszczenia na podstawie czujnika obecności cząstek.

Badanie wykonano w jednym z pomieszczeń biurowych NIZP PZH – PIB, w którym praca odbywała się w godzinach 7:00 – 16:00. Powierzchnia pomieszczenia wynosiła około 40 m² przy wysokości około 4,50 m. Pomieszczenie wyposażone było w wentylację grawitacyjną. Okna przez cały okres prowadzenia badań były zamknięte. Przeprowadzono sześć pomiarów czystości mikrobiologicznej powietrza w odstępach 1h każdy, gdzie:

- t0 = pomiar godzinę przed uruchomieniem urządzenia, bezpośrednio po nocnej przerwie w użytkowaniu pomieszczenia;
- t1 = pomiar bezpośrednio przed uruchomieniem urządzenia, po 1h standardowego użytkowania pomieszczenia;
- t2 = pomiar godzinę po włączeniu urządzenia;
- t3 = pomiar dwie godziny po włączeniu urządzenia;
- t4 = pomiar trzy godziny po włączeniu urządzenia;
- t5 = pomiar godzinę po wyłączeniu urządzenia.

3. Urządzenie C - przepływowa lampa UV-C z filtrem węglowym

Przepływowa lampa UV-C, przeznaczona do montażu ściennego lub na statywie, wyposażona w dwa promienniki UV-C o mocy 55W każdy oraz węglowy filtr

powietrza. Wydajność urządzenia w zakresie przepływu powietrza wynosiła 165 m³/h.

Badanie wykonano w jednym z pomieszczeń biurowych NIZP PZH - PIB, w którym praca odbywała się w godzinach 8:00 – 16:00. Powierzchnia pomieszczenia wynosiła około 20 m² przy wysokości około 2,50m. Pomieszczenie wyposażone było w wentylację grawitacyjną. Okna przez cały okres prowadzenia badań były zamknięte. Przeprowadzono sześć pomiarów czystości mikrobiologicznej powietrza w odstępach 1h każdy, gdzie:

- t0 = pomiar godzinę przed uruchomieniem urządzenia, bezpośrednio po nocnej przerwie w użytkowaniu pomieszczenia;
- t1 = pomiar bezpośrednio przed uruchomieniem urządzenia, po 1h standardowego użytkowania pomieszczenia;
- t2 = pomiar godzinę po włączeniu urządzenia;
- t3 = pomiar dwie godziny po włączeniu urządzenia;
- t4 = pomiar trzy godziny po włączeniu urządzenia;
- t5 = pomiar godzinę po wyłączeniu urządzenia.

Wyniki

Wyniki oznaczeń ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu pomieszczeń, w których testowano skuteczność trzech urządzeń oczyszczających powietrze w zakresie redukcji zanieczyszczeń mikrobiologicznych przedstawiono w poniższych tabelach i wykresach. Oprócz oznaczeń mikrobiologicznych prowadzono też pomiary środowiska badań, w tym pomiary temperatury, wilgotności powietrza oraz stężenia CO₂ i obserwowano zmienną liczbę osób przebywających w pomieszczeniach w trakcie trwania pomiarów.

Urządzenie A

Wyniki badań w zakresie warunków środowiskowych w trakcie badań skuteczności redukcji ogólnej liczby bakterii i grzybów

w powietrzu urządzenia A przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów warunków środowiskowych w trakcie badania skuteczności działania urządzenia A.

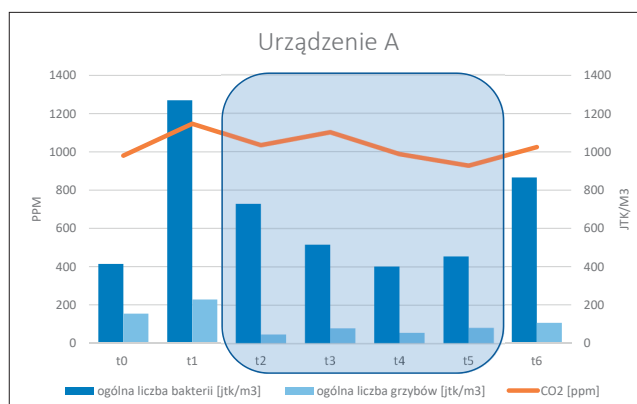
Table 1. Results of the environmental conditions tests during the device A working.

pomiar	temperatura [°C]	wilgotność [%]	liczba osób w pomieszczeniu	CO ₂ [ppm]
t0	22,8	21,7	7	980
t1	23,5	24,8	7	1147
t2	24,3	21,1	7	1034
t3	24,8	21,6	7	1101
t4	24,9	25,0	7	987
t5	25,0	18,7	7	927
t6	25,3	19,7	7	1025

Warunki środowiskowe w trakcie wykonywania pomiarów były stabilne w zakresie temperatury i wilgotności powietrza. Obserwowano stały wzrost temperatury powietrza z 22,8°C(t0) do 25,3°C(t6). Wilgotność powietrza wahała od 21,7% (t0) do 25,0% (t4), po czym zaobserwowano wyraźny spadek do 18,7% (t5). Podczas ostatniego pomiaru odnotowano wilgotność powietrza na poziomie 19,7%. Duża kubatura pomieszczenia i działająca wentylacja mechaniczna sprawiły, że pomimo znacznej liczby osób w nim przebywających, w trakcie badań obserwowano stały poziom stężenia dwutlenku węgla w zakresie 927 ppm – 1147 ppm. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na specyfikę pomieszczenia (SOR) i charakter pracy personelu medycznego, osoby przebywające w pomieszczeniu często przemieszczały się, a także wchodziły i wychodziły do i z obszaru objętego badaniem.

Wyniki badań ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu pomieszczenia, w którym znajdowało się urządzenie A przedstawiono na rys. 1. Błękitną ramką oznaczono zakres pomiarów, wykonanych w trakcie pracy oczyszczacza powietrza.

Na podstawie wyników pomiaru ogólnej liczby bakterii i ogólnej liczby grzybów w powietrzu badanego pomieszczenia szpitalnego, podczas pracy urządzenia A, którego działanie oparte było o proces filtracji mechanicznej powietrza, wyposażonego



Rys. 1. Zmiany ogólnej liczby bakterii i grzybów oraz zawartości CO₂ w powietrzu pomieszczenia podczas pracy urządzenia A.
Fig. 1. Changes in the total number of bacteria and fungi and CO₂ concentration in the indoor air observed during the device A working.

w generator zimnej plazmy (rys. 1), zaobserwowano spadek ogólnej liczby drobnoustrojów (bakterie oraz grzyby) w trakcie prac wykonanych w trakcie pracy urządzenia w stosunku do wyników z pomiaru t1 – stanowiącego wartości odniesienia dla skutecznego działania urządzenia. Wzrost stężenia ogólnej liczby bakterii i ogólnej liczby grzybów zaobserwowany przy pomiarze t1 w stosunku do pomiaru t0 wiązał się prawdopodobnie ze zwiększeniem się liczby osób przebywających w tym czasie w badanym pomieszczeniu. Po 4h pracy urządzenia A (t5) stężenie bakterii w powietrzu pomieszczenia uległo redukcji o 64,25% w stosunku do wartości oznaczonych w powietrzu bezpośrednio przed włączeniem urządzenia (t1). Ostatni pomiar, wykonany po godzinie od wyłączenia urządzenia (t6), wykazał ponowny wzrost wartości ogólnej liczby bakterii o 190,74% w stosunku do pomiaru t5. W przypadku oznaczeń ogólnej liczby grzybów również obserwowano spadek w wysokości 43,68% w stosunku do wartości oznaczonej bezpośrednio przed uruchomieniem urządzenia A (t1). Po 1h pracy urządzenia (t2) dalsza redukcja wyniosła 78,95% i w kolejnych godzinach ulegała wahaniom od 64,91% (t3) i 75,43% (t4) oraz 77,19% (t5) odpowiednio po 3h i po 4h pracy urządzenia. Pomiar wykonany po godzinie od wyłączenia urządzenia (t6) wykazał ponowny wzrost wartości ogólnej liczby grzybów o 203,85% w stosunku do pomiaru t5.

Urządzenie B

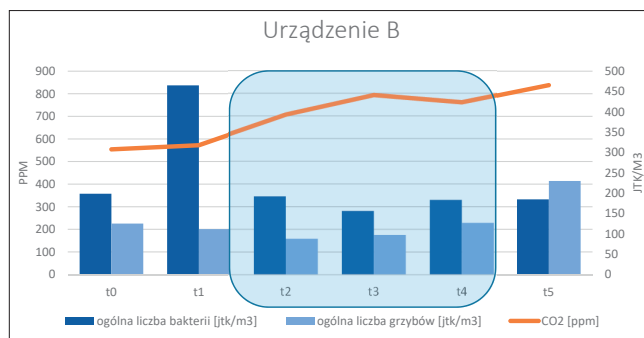
Wyniki badań w zakresie warunków środowiskowych w trakcie badań skuteczności redukcji ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu urządzenia B przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów warunków środowiskowych w trakcie badania skuteczności działania urządzenia B.

Table 2. Results of the environmental conditions tests during the device B working.

pomiar	temperatura [°C]	wilgotność [%]	liczba osób w pomieszczeniu	CO ₂ [ppm]
t0	21,5	41,4	2	554
t1	23,1	43,5	3	572
t2	21,3	47,8	3	706
t3	23,6	41,4	3	792
t4	23,3	42,3	4	760
t5	23,8	44,4	3	838
t6	25,3	19,7	7	1025

Warunki środowiskowe w trakcie wykonywania pomiarów były stabilne w zakresie temperatury i wilgotności powietrza. Podczas pomiaru wykonanego po godzinie pracy urządzenia (t2) stwierdzono spadek temperatury o ok. 2°C, powiązany ze wzrostem wilgotności o ok. 4%. Spowodowane



Rys.2. Zmiany ogólnej liczby bakterii i grzybów oraz zawartości CO₂ w powietrzu pomieszczenia podczas pracy urządzenia B.
Fig. 2. Changes in the total number of bacteria and fungi and CO₂ concentration in the indoor air observed during the device B working.

było to wymuszonym ruchem powietrza w pomieszczeniu, który był następstwem działania oczyszczacza powietrza. W trakcie badań obserwowano stały wzrost dwutlenku węgla wywołany obecnością osób wykonujących rutynową pracę oraz osób pobierających próbki powietrza.

Wyniki badań ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu pomieszczenia, w którym znajdowało się urządzenie B przedstawiono na rys. 2. Błękitną ramką oznaczono zakres pomiarów, wykonanych w trakcie pracy oczyszczacza powietrza.

Podczas pierwszego pomiaru (t0), wykonanego przed uruchomieniem urządzenia, liczba bakterii wynosiła 198,7 jtk/m³, a grzybów 125,3 jtk/m³. Pomiar należy przyjąć jako mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza w pomieszczeniu po nocy poprzedzającej dzień roboczy, w którym prowadzono badania. Kolejny pomiar (t1) wykonano po 1h użytkowania pomieszczenia przez pracowników, bezpośrednio przed włączeniem urządzenia do oczyszczania powietrza. Pomiar ten stanowił poziom odniesienia dla obliczeń wartości redukcji badanych parametrów mikrobiologicznych. Liczba oznaczonych komórek bakterii wzrosła ponad dwukrotnie, do poziomu 465 jtk/m³. Po godzinie pracy urządzenia (t2) liczba bakterii spadła do poziomu z pierwszego pomiaru (t0). W kolejnym pomiarze (t3) zaobserwowano dalszy spadek liczby bakterii do poziomu 156 jtk/m³. Ostatni pomiar podczas pracy urządzenia (t4) wykazał wzrost ogólnej liczby bakterii. Wzrost ten pokrywał się ze wzrostem liczby osób, które były obecne w pomieszczeniu podczas prowadzenia badań. Oznaczenie wykonane godzinę po wyłączeniu urządzenia (t5) wykazało brak wyraźnej zmiany w ogólnej liczbie bakterii w stosunku do pomiaru t4. W przypadku oznaczeń ogólnej liczby grzybów w powietrzu pomieszczenia zaobserwowano brak zmian oznaczonych wartości pomiędzy pomiarem t0 i t1. Po godzinie pracy urządzenia (t2) liczba grzybów spadła do poziomu 88 jtk/m³, a po kolejnej godzinie zaobserwowano nieznaczny wzrost do poziomu 97 jtk/m³. Podobnie jak przy oznaczeniach ogólnej liczby bakterii w przypadku

pomiaru t4 stwierdzono wzrost ogólnej liczby grzybów. Oznaczenie wykonane godzinę po wyłączeniu urządzenia (t5) wykazało blisko dwukrotny wzrost ogólnej liczby grzybów do wartości 230 jtk/m³. W trakcie kolejnych oznaczeń obserwowano stały wzrost stężenia CO₂ oznaczanego w powietrzu pomieszczenia. Przeprowadzone badanie wykazało wyraźny spadek ogólnej liczby bakterii i niewielką redukcję ogólnej liczby grzybów w wyniku pracy urządzenia B. Stwierdzona redukcja nie była jednak stała. Biorąc pod uwagę powyższe można stwierdzić, że efekt działania urządzenia ograniczony był do utrzymywania zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza (bakterie i grzyby) na stałym poziomie, niższym niż wartości stwierdzone przed uruchomieniem urządzenia jednak porównywalnym do poziomu zanieczyszczenia mikrobiologicznego oznaczonego bezpośrednio po nocy, kiedy pomieszczenie nie było użytkowane.

Urządzenie C

Wyniki badań w zakresie warunków środowiskowych w trakcie badań skuteczności redukcji ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu urządzenia C przedstawiono w tabeli 3.

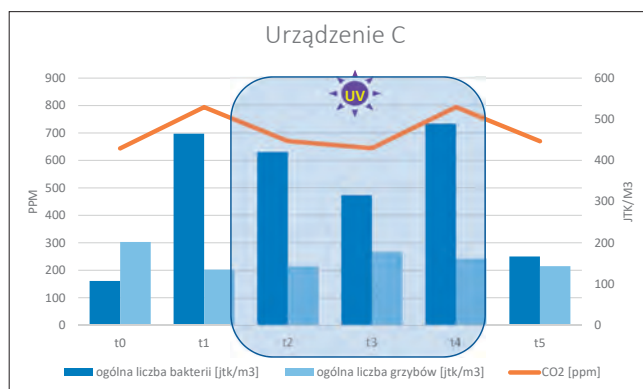
Tabela 3. Wyniki pomiarów prowadzonych w celu przetestowania skuteczności działania urządzenia C.

Table 3. Results of the environmental conditions tests during the device C working.

pomiar	temperatura [°C]	wilgotność [%]	liczba osób w pomieszczeniu	CO ₂ [ppm]
t0	24,8	40,8	2	644
t1	24,5	42,3	3	794
t2	24,5	42,4	3	670
t3	24,8	40,8	3	644
t4	24,5	42,3	4	794
t5	24,8	40,8	3	670
t6	25,3	19,7	7	1025

Warunki środowiskowe w trakcie wykonywania pomiarów były stabilne w zakresie temperatury i wilgotności powietrza. Nie obserwowano też znaczących zmian w wartościach stężenia dwutlenku węgla.

Wyniki badań ogólnej liczby bakterii i grzybów w powietrzu pomieszczenia,



Rys. 3. Zmiany ogólnej liczby bakterii i grzybów oraz zawartości CO₂ w powietrzu pomieszczenia podczas pracy urządzenia C.

Fig. 3. Changes in the total number of bacteria and fungi and CO₂ concentration in the indoor air observed during the device C working.

w którym znajdowało się urządzenie C przedstawiono na rys. 3. Błękitną ramką oznaczono zakres pomiarów, wykonanych w trakcie pracy oczyszczacza powietrza.

Oznaczenia ogólnej liczby bakterii oraz grzybów w czasie t₀ – godzinę przed uruchomieniem urządzenia oraz bezpośrednio po rozpoczęciu pracy w pomieszczeniu wykazały odpowiednio 107,3 jtk/m³ oraz 202 jtk/m³. Po 1 godzinie wykonano kolejny pomiar (t₁) i natychmiast uruchomiono urządzenie. Odnotowano wyraźny wzrost liczby bakterii w 1 m³, do 465 jtk, spowodowany prawdopodobnie przeszło dwugodziną obecnością większej liczby osób w pomieszczeniu. Po dwóch godzinach pracy urządzenia C zaobserwowano redukcję ogólnej liczby bakterii na poziomie 32,3% w stosunku do pomiaru t₁. Oznaczenie wykonane po 3h pracy lampy UV (t₄) wykazało nieznaczny wzrost liczby bakterii (489,3 jtk/m³), w porównaniu z pomiarem wykonanym przed rozpoczęciem pracy urządzenia C. W trakcie ostatniego pomiaru stwierdzono spadek ogólnej liczby bakterii do poziomu 167 jtk/m³. Zmiana ta spowodowana była prawdopodobnie brakiem wymuszonego ruchu powietrza, powodowanego przez pracującą lampę UV. Zaobserwowano jednocześnie pewną korelację pomiędzy zmianami ogólnej liczby bakterii, a stężeniem CO₂ w powietrzu badanego pomieszczenia. Wzrost stężenia CO₂, wywołany obecnością zwiększonej liczby osób w pomieszczeniu był zbliżony ze wzrostem oznaczanej liczby bakterii, których źródło w pomieszczeniach stanowią zazwyczaj ludzie. W przypadku oznaczeń ogólnej liczby grzybów w powietrzu pomieszczenia zaobserwowano jej spadek do 135 jtk/m³ po 1h użytkowania pomieszczenia, ale przed uruchomieniem urządzenia C. Kolejne godziny pracy urządzenia nie wykazały istotnych zmian w oznaczanych wartościach ogólnej liczby grzybów w powietrzu. Po 3h pracy lampy UV zaobserwowano niewielki wzrost tego parametru do 162 jtk/m³, w stosunku do wyników oznaczonych w trakcie pomiaru t₁. Podczas pomiaru t₅, wykonanego 1h po wyłączeniu urządzenia C nie stwierdzono znaczących zmian w liczbie grzybów oznaczanych w powietrzu pomieszczenia.

W warunkach rzeczywistych, badana przepływowo lampa UV-C, nie była w stanie zapewnić skutecznej redukcji liczby drobnoustrojów w powietrzu pomieszczenia pomimo jej doboru wg wskazań producenta w zakresie kubatury pomieszczenia, do którego urządzenie było dedykowane. Uzyskane wyniki badań mogły dodatkowo sugerować, że obserwowany wzrost ogólnej liczby bakterii w trakcie pracy urządzenia mógł być dodatkowo powodowany ruchem powietrza, który wywoływała praca przepływowej lampy UV-C, będącej przedmiotem badań.

Dyskusja

W przypadku wszystkich trzech badanych urządzeń przeznaczonych do oczyszczania powietrza wykazano, że ich skuteczność w zakresie redukcji mikrobiologicznych zanieczyszczeń powietrza (bakterie i grzyby) była wyraźnie niższa niż skuteczność deklarowana przez producentów/dystrybutorów w treści ulotek informacyjnych, oparta zazwyczaj na wynikach badań przeprowadzonych w warunkach modelowych, bez obecności ludzi w pomieszczeniu lub komorze testowej. Uzyskane wyniki badań były zgodne z pojawiającymi się w tym obszarze doniesieniami naukowymi, gdzie w ściśle określonych warunkach modelowych większość oczyszczaczy powietrza charakteryzuje się bardzo wysoką skutecznością działania, dochodzącą do 100%, co nie odzwierciedla ich skuteczności w warunkach rzeczywistych [54]. Jedynie urządzenie A, którego działanie oparte było o kilkustopniową filtrację powietrza oraz emisję zimnej plazmy wykazało skuteczność redukcji drobnoustrojów na poziomie blisko 65% w stosunku do bakterii i przeszło 77% w stosunku do grzybów obecnych w powietrzu badanego pomieszczenia. Nadal jednak były to wartości znacząco niższe niż deklarowane przez producenta, tj. 99,99%. Inne badania nad skutecznością technologii zimnej plazmy wskazują, że w zależności od środowiskowych warunków pracy, osiągnąć efekty redukcji w zakresie od 20% do 70% w stosunku do różnych szczepów bakterii i grzybów [32-34, 55]. Należy też brać pod

uwagę, że wyraźna redukcja mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza w tym przypadku była wynikiem dwóch składowych funkcji urządzenia A, a mianowicie filtracji powietrza i oddziaływania zimnej plazmy. Przeprowadzone badania nie pozwalają na stwierdzenie skuteczności tych dwóch technologii rozdzielnie, a ocena urządzenia obejmuje ich sumaryczne oddziaływanie. W celu pełnej oceny tego rodzaju oczyszczaczy powietrza, z uwzględnieniem ich bezpieczeństwa zdrowotnego dla osób przebywających w pomieszczeniach, należy brać też pod uwagę poziom emisji jonów i wolnych rodników, a także ozonu. Z punktu widzenia wpływu zanieczyszczeń powietrza wewnątrz pomieszczeń na zdrowie człowieka konieczna jest analiza potencjalnego negatywnego wpływu tych ubocznych produktów procesu generowania zimnej plazmy, zwłaszcza w przypadku urządzeń o dużej mocy [31]. Niestety producenci i dystrybutorzy bardzo rzadko dysponują tego typu danymi, a w treści materiałów reklamowych, potencjalny negatywny wpływ na zdrowie użytkowników jest całkowicie pomijany.

W przypadku urządzenia B również mieliśmy do czynienia z połączeniem dwóch technologii oczyszczających powietrze, to jest z filtracją mechaniczną oraz procesem fotokatalizacyjnym. Uzyskane wyniki wykazały tylko częściowy wpływ pracy urządzenia na czystość mikrobiologiczną powietrza. W wyniku jego działania stwierdzono redukcję liczby bakterii i grzybów do poziomu sprzed badań, kiedy pomieszczenie było puste bezpośrednio po nocy i braku jego użytkowania. Skuteczność działania procesu fotokatalizy podczas oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń mikrobiologicznych została potwierdzona w wielu badaniach modelowych z wykorzystaniem określonych szczepów bakterii i grzybów. Nie ma jednak metod referencyjnych, które mogą zostać zastosowane w celu potwierdzenia skutecznego działania urządzeń tego typu, zarówno stosowanych w systemach wentylacyjnych obiektów jak i urządzeń przenośnych – tzw. oczyszczaczy powietrza [41, 42]. Vohra et. al. [56] oraz Mitoraj et al. [57] wykazali, że bakterie z rodzaju *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* i *Escherichia coli* ulegały prawie całkowitej inaktywacji po różnym okresie ekspozycji, wynoszącym od 1h do 24h. Grzyby z rodzaju *Aspergillus niger* ulegały z kolei pełnej inaktywacji po ekspozycji wynoszącej 48h. Sánchez et al. [58] wykazali, że odpowiednio dobrana technologia wykorzystująca reakcje fotokatalizacyjne stosowana w warunkach rzeczywistych jest skuteczna w stosunku do bakterii jednak w celu osiągnięcia pełnej inaktywacji grzybów należy przeprowadzić szereg modyfikacji proce-

su, włączając w to moc promieniowania UV aktywującego proces, czas ekspozycji i wielkość złoża fotokatalitycznego. Potwierdza to wcześniej cytowane dane, wskazujące, że skuteczność procesu oczyszczania powietrza w wyniku zastosowania urządzeń oczyszczających zależy przede wszystkim od właściwego doboru parametrów procesu, w tym właściwego doboru technologii oczyszczania oraz warunków środowiskowych i wydajności urządzeń w zakresie przepływu powietrza [27]. Ważnym aspektem jest też kwestia bezpieczeństwa zdrowotnego osób przebywających w pomieszczeniach, w których funkcjonują urządzenia zawierające złoża fotokatalityczne, szczególnie w kontekście uwalniania się nanocząstek związków aktywnych jak np. TiO_2 . Mechanizmy odpowiedzialne za negatywny wpływ nanocząstek nie zostały jeszcze do końca odkryte i jest to aktualnie istotny obszar dla przyszłych badań [43]. Badane urządzenie B wykazało tylko częściową skuteczność oczyszczania powietrza w zakresie zanieczyszczeń mikrobiologicznych, jego zastosowanie pozwalało na obniżenie stężenia bakterii i grzybów w powietrzu, jednak mimo kilkugodzinnej pracy nie udało się tych zanieczyszczeń usunąć na stałe. Podobnie jak w przypadku urządzenia A, oczyszczacz powietrza B działał na zasadzie dwóch połączonych technologii oczyszczania. W tym przypadku na zasadzie filtracji mechanicznej i fotokatalizy. Na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzano, która z nich przyczyniła się do zauważalnego efektu redukcji liczby drobnoustrojów. Oceniano skuteczność urządzenia, a nie poszczególnych technologii.

Podczas badań skuteczności oczyszczania powietrza z mikroorganizmów przez urządzenie C nie stwierdzono stałego efektu redukcji bakterii i grzybów. Co więcej, zaobserwowano wzrost oznaczanej liczby drobnoustrojów mimo działającej lampy UV-C. Guimera et al. [59] wykazali, że przepływowo lampy UV-C, stosowane w różnych pomieszczeniach obiektu opieki zdrowotnej wykazywały skuteczną redukcję liczby bakterii i grzybów w powietrzu pomieszczeń czystych mikrobiologicznie, charakteryzujących się niewielką liczbą osób w nich przebywających jak np. pomieszczenia strictly medyczne. W przypadku ogólnodostępnych obszarów jak np. korytarze, nie zaobserwowano wpływu działających lamp UV-C na stężenie bakterii i grzybów w powietrzu. Podobne wnioski zaprezentowała Kujundzić et al. [60] na podstawie badań przeprowadzonych z przepływową lampą UV-C zainstalowaną wewnątrz testowanego oczyszczacza powietrza. Lampa nie wykazywała znaczącego wpływu na redukcję mikroorganizmów w powietrzu przepływającym przez urządze-

nie. Wyraźny wpływ promieniowania UV potwierdzono jednak dla tej samej lampy, która działała bezpośrednio na drobnoustroje zawieszane wewnątrz filtra powietrza stosowanego w oczyszczaczu w ciągu 60 min. Wskazano, że niski efekt redukcji mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza w wyniku działania przepływowych lamp UV-C może być związany z krótkim czasem ekspozycji komórek drobnoustrojów na to promieniowanie. Ze względu na potwierdzone działanie promieniowania UV-C w zakresie inaktywacji drobnoustrojów, lampy UV dostępne na rynku są prezentowane jako urządzenia uniwersalne, których skuteczne działanie jest potwierdzone w sposób uniwersalny. Pomijany jest fakt, że skuteczność oddziaływania promieniowania UV zależy zawsze od podatności danego rodzaju lub gatunku drobnoustroju, długości fali i mocy promienników (lamp) oraz objętości i wilgotności powietrza poddanego promieniowaniu [61-66]. Przeprowadzone badanie wykazało, że testowana przepływowa lampa UV-C, pomimo teoretycznie odpowiedniej mocy i wydajności przepływu powietrza, nie spełniła swojej funkcji w zakresie redukcji oznaczanej liczby bakterii i grzybów w powietrzu.

W związku z trwającą pandemią oraz bardzo dużym zainteresowaniem w zakresie działań mających na celu poprawę czystości powietrza wewnątrz pomieszczeń, wiele organizacji międzynarodowych zajmujących się zdrowiem ludzi w kontekście wentylacji pomieszczeń wydało szereg zaleceń i wytycznych. Wśród nich najczęściej wymienia się zwiększenie wymiany powietrza w pomieszczeniach w stosunku do stanu sprzed pandemii, unikanie recyrkulacji powietrza oraz utrzymanie systemów wentylacji mechanicznej w systemie pracy ciągłej, a w pomieszczeniach wentylowanych grawitacyjnie zapewnienie częstej wymiany powietrza przez systematyczne wietrzenie poprzez otwieranie okien. Nie stwierdzono jednak rekomendacji w zakresie stosowania mobilnych oczyszczaczy powietrza jako rozwiązania równorzędnego z wymienionymi wyżej metodami, podkreślając ograniczone dane dotyczące ich skuteczności i wątpliwości związane z ich bezpieczeństwem dla zdrowia, głównie w kontekście emisji ozonu. Nie zakazuje się jednocześnie ich stosowania - jako rozwiązania wspomagającego wietrzenie pomieszczeń lub wentylację mechaniczną, lecz wskazuje się, że nie powinny one zastępować zalecanych metod postępowania. Dodatkowo, wykorzystywanie tego typu urządzeń powinno być poprzedzone każdorazowo odpowiednią analizą ryzyka, uwzględniającą potencjalny negatywny wpływ takich urządzeń na zdrowie człowieka [67-72].

Wnioski:

1. Skuteczność oczyszczaczy powietrza w zakresie redukcji ogólnej liczby bakterii i grzybów zbadana w warunkach rzeczywistych była znacząco niższa niż wartości deklarowane przez ich producentów w treści materiałów reklamowych.
2. Urządzenia, w których zastosowano wielostopniową filtrację powietrza oraz dodatkowe technologie oczyszczania jak fotokataliza czy generator zimnej plazmy wykazywały większą skuteczność w zakresie inaktywacji drobnoustrojów (bakterie i grzyby) w porównaniu z prostym urządzeniem, które działało jedynie na zasadzie jednej techniki oczyszczania.
3. Zastosowanie oczyszczaczy powietrza, szczególnie w okresie pandemii, nie powinno być jedynym sposobem poprawy jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń ze względu na brak danych potwierdzających ich rzeczywistą skuteczność.
4. Zastosowanie oczyszczaczy powietrza do poprawy jego mikrobiologicznej jakości wewnątrz pomieszczenia powinno być każdorazowo poprzedzone odpowiednim doбором urządzenia w zakresie parametrów pomieszczenia docelowego i liczby osób w nim przebywających, mocy urządzenia oraz właściwej technologii oczyszczania.
5. Konieczne są dalsze prace mające na celu zbadanie większej liczby urządzeń dostępnych na rynku w zakresie ich skuteczności działania, a także emisji szkodliwych dla zdrowia produktów ubocznych powstających w wyniku działania oczyszczaczy powietrza, szczególnie tych, które stosują technologię fotokatalizy, zimnej plazmy i emitują promieniowanie UV.

PIŚMIENNICTWO:

1. Fields, B.S.; Benson, R.F.; Besser, R.E. Legionella and Legionnaires' Disease: 25 years of investigation. *Clin. Microbiol. Rev.* 2002, *15*, 506-526; DOI: 10.1128/CMR.15.3.506-526.2002.
2. Douwes, J.; Thorne, P.; Pearce, N.; Heederik, D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Ann. Occup. Hyg.* 2003, *47*: 187-200; DOI: 10.1093/annhyg/meg032.
3. Li, Y.; Leung, G.M.; Tang, J.W.; Yang, X.; Chao, C.Y.H.; Lin, J.Z.; Lu, J.W.; Nielsen, P.V.; Niu, J.; Qian, H.; Sleigh, A.C.; Su, H.-J.J.; Sundell, J.; Wong, T.W.; Yuen, P.L. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air.* 2007, *17*: 2-18; DOI: 10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x.
4. Peccia, J.; Milton, D.K.; Reponen, T.; Hill, J. A role for environmental engineering and science in preventing bioaerosol-related disease. *Environ. Sci. Technol.* 2008, *42*: 4631-4637; DOI: 10.1021/es087179e.

5. Falkinham, J.O. Surrounded by mycobacteria: nontuberculous mycobacteria in the human environment. *J. Appl. Microbiol.* 2009, *107*: 356–367; DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04161.x.
6. Hospodsky, D.; Qian, J.; Nazaroff, W.W.; Yamamoto, N.; Bibby, K.; Rismani-Yazdi, H.; Peccia, J. Human Occupancy as a Source of Indoor Airborne Bacteria. *PLoS One* 2012, *7*: e34867. DOI: 10.1371/journal.pone.0034867.
7. Szałański P., Cępiński W. Prawdopodobieństwo przenoszenia wirusa SARS-CoV-2 w pomieszczeniach wentylowanych, *INSTAL* 2/2022; DOI 10.36119/15.2022.2.58.
8. Morawska L i wsp. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection,” *Science* 2021. *372*, no. 6543: 689–691, , doi: 10.1126/science.abg2025
9. Klepeis, N.E.; Nelson, W.C.; Ott, W.R.; Robinson, J.P.; Tsang, A.M.; Switzer, P.; Behar, J.V.; Hern, S.C.; Engelmann, W.H. The national human activity pattern survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 2001, *11*: 321–252. DOI: 10.1038/sj.jea.7500165.
10. Brasche, S.; Bischof, W. Daily time spent indoors in German homes - Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 2005, *208*: 247–253. DOI: 10.1016/j.ijheh.2005.03.003.
11. Yang, W.; Lee, K.; Yoon, C.; Yu, S.; Park, K.; Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2011, *21*: 310–316. DOI: 10.1038/jes.2010.23.
12. Krzysko-Lupicka, T. Zagrożenia mikologiczne w budownictwie – problem ogólnościatowy w: *Problemy w ochronie środowiska w województwie opolskim w latach 2010-2020.* (red. K. Oszańca). Opolskie Ekoforum. *Atmoterm S.A.* 2010; 203-222.
13. Luengas A.; Barona A.; Hort, C.; Gallastegui, G.; Platel, V.; Elias, A. A review of indoor air treatment technologies. *Rev Environ. Sci. Biotechnol.* 2015, *14*: 499–522, DOI:10.1007/s11157-015-9363-9.
14. Chróst A., Grzyby pleśniowe w środowisku człowieka – zagrożenie i skutki zdrowotne *Med. Dośw. Mikrobiol.*, 2016, *68*: 135 – 150.
15. Janińska B.: *Metody oceny skażenia obiektów budowlanych grzybami pleśniowymi.* Foundations of Civil and Environmental Engineering 2002; 3: 47-64.
16. Augustyńska D.; Pośniak M. *Czynniki szkodliwe w środowisku pracy wartości dopuszczalne.* CIOP- PIB. Warsaw, Poland, 2014.
17. Gołofit-Szymczak M.; Ławniczek-Wałczyk A.; Górny R.L. Bioaerozole w pomieszczeniach pracy - źródła i zagrożenia. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*, 2013, 3: 9-11.
18. Szałański P., Cępiński W., Misiński J., “Przeгляд zaleceń dla instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w związku z zagrożeniem koronawirusem SARS-CoV-2 i chorobą COVID-19,” *INSTAL* 2022, *5*: 17-21. DOI: 10.36119/15.2020.5.3.
19. Gołofit-Szymczak M.; Skowroń J. Zagrożenia mikrobiologiczne w pomieszczeniach biurowych. *Bez. Pr.* 2005, 3: 29-31.
20. Leung, D.Y.C. Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Front. environ. Sci.* 2015; *2*: 69, DOI=10.3389/fenvs.2014.00069.
21. Levin, H. Controlling Sources of Indoor Air Pollution. In: Knöppel, H.; Wolkoff P. (eds) *Chemical, Microbiological, Health and Comfort Aspects of Indoor Air Quality – State of the Art in SBS.* Eurocourses: Chemical and Environmental Science, 1992, 4. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-015-8088-5_22.
22. Zaatari, M.; Nirlo, E.; Jaremit, D.; Crain, N.; Srebric, J.; Siegel, J. Ventilation and indoor air quality in retail stores: a critical review (RP-1596). *HVAC&R Res.* 2014, *20*:276–294.
23. Basińska, M.; Michalkiewicz, M.; Ratajczak, K. Impact of physical and microbiological parameters on proper indoor air quality in nursery. *Environ. Int.*, 2019, *132*; DOI: 10.1016/j.envint.2019.105098.
24. Aditya, R.; Chetan M.; Sarthak, J.; Naveen, S. A review of general and modern methods of air purification. *J. Therm. Eng. (Istanbul, Turk.)*, 2018, *5*:22-28. DOI: 10.18186/thermal.529054.
25. Luengas, A.; Barona, A.; Hort, C. A review of indoor air treatment technologies. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2015, *14*:499–522. DOI: 10.1007/s11157-015-9363-9.
26. Kurnitski J., Kil M., Wargocki P, Boerstra A., Seppanen O., Olesen B., Morawska L. Respiratory infection riskbased ventilation design method. *Build Environ.* 2021, *206*, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108387
27. González-Marín, J.; Kraakman, N.J.R.; Pérez, C.; Lebrero, R.; Raúl Muñoz. A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. *Chemosphere.* 2021, *262*. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128376.
28. *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms.* Zhonglin Xu. ISBN 978-3-642-39374-7 (eBook), 2014, pp: 267-288.
29. Al-abdalall, A.H.; Al-dakheel, S.A.; Al-Abkari, H.A. *Energy-efficient and Sustainable Buildings.* 2019. Impact of Air-Conditioning Filters on Microbial Growth and Indoor Air Pollution. 2019, Chapter 1, p:1-22. DOI: 10.5772/intechopen.88548.
30. Möritz M.; Peters H.; Nipko B.; Rüdén H. Capability of air filters to retain airborne bacteria and molds in heating, ventilating and air-conditioning (HVAC) systems, *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 2001, *203*: 401-409. DOI:10.1078/1438-4639-00054.
31. Niedźwiedz, I.; Waśko, A.; Pawłat, J.; Polak-Berecka, M.; The State of Research on Antimicrobial Activity of Cold Plasma. *Pol J Microbiol.* 2019, *68*(2):153-164. DOI: 10.33073/pjm-2019-028.
32. Liang, Y.; Wu, Y.; Sun, K.; Chen, Q.; Shen, F.; Zhang, J.; Yao, M.; Zhu, T.; Fang, J. Rapid inactivation of biological species in the air using atmospheric pressure nonthermal plasma. *Environ Sci Technol.* 2012, *46*(6):3360–3368. DOI: 10.1021/es203770q.
33. Gallagher, M.J.; Vaze, N.; Gangoli, S.; Vasilets, V.N.; Gutsol, A. F.; Milovanova, T.N.; Anandan, S.; Murasko, D.M.; Fridman, A.A. Rapid inactivation of airborne bacteria using atmospheric pressure dielectric barrier grating discharge. *IEEE Trans Plasma Sci.* 2007, *35*(5):1501–1510. DOI:10.1109/TPS.2007.905209.
34. Korachi, M.; Turan, Z.; Şentürk, K.; Şahin, F.; Aslan, N. An investigation into the biocidal effect of high voltage AC/DC atmospheric corona discharges on bacteria, yeasts, fungi and algae. *J Electrostat.* 2009, *67*(4):678–685. DOI: 10.1016/j.elstat.2009.03.002.
35. Liao, X.; Liu, D.; Xiang, Q.; Ahn, J.; Chen, S.; Ye, X.; Ding, T. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes. A review. *Food Control.* 2017, *75*:83–91. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.12.021
36. Fan, X.; Zhu, T.L.; Wang, M.Y.; Li, X.M. Removal of low-concentration BTX in air using a combined plasma catalysis system. *Chemosphere.* 2009, *75*(10):1301–1306. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.03.029
37. Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., Reuter S., Graves D.B., Ostrikov K. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Physics Reports.* 2016, *630*: 1-84, ISSN0370-1573, https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.03.003
38. Aghighi, A.; Haghghat, F. Evaluation of nano-titanium dioxide (TiO2) catalysts for ultraviolet photocatalytic oxidation air cleaning devices. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015, *3*:1622–1629. DOI: 10.1016/j.jece.2015.05.019
39. Hay, S. O.; Obee, T.; Luo, Z.; Jiang, T.; Meng, Y.; He, J.; Murphy, S. C.; Suib, S. (2015). The viability of photocatalysis for air purification. *Molecules* (Basel, Switzerland). 2015, *20*(11):1319–1356. DOI: 10.3390/molecules20011319.
40. Zhong, L.; Haghghat, F.; Lee, C.S.; Lakdawala, N. Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air applications: systematic experimental evaluation. *J. Hazard Mater.* 2013, *261*:130–138. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.07.014
41. Residential air cleaners. *Indoor Air Quality (IAQ)*, 3rd Edition. Portable Air Cleaners Furnace and HVAC Filters. EPA 402-F-09-002, July 2018, EPA Indoor Environments Division, USA.
42. Mamaghani, A.H.; Haghghat, F.; Lee, C.S. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art, *Applied Catalysis B: Environmental.* 2017, *203*: 247-269. DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.10.037.
43. Baranowska-Wójcik, E.; Szwajgier, D.; Oleszczuk, P. Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles Exposure on Human Health—a Review. *Biol Trace Elem Res.* 2020, *193*:118–129. DOI:10.1007/s12011-019-01706-6
44. Shining a Light on COVID-19. *Nat. Photonics.* 2020, *14*, 337. DOI: 10.1038/s41566-020-0650-9
45. García de Abajo, F. J.; Hernández, R. J.; Kammer, I.; Meyerhans, A.; Rosell-Llompart, J.; Sanchez-Elsner, T. Back to Normal: An Old Physics Route to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces. *ACS Nano.* 2020, *14*, DOI:7704.10.1021/acsnano.0c04596.
46. Kowalski, W.; Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook: UVGI for Air and Surface Disinfection; 2009, Springer: Berlin Heidelberg. DOI:10.1007/978-3-642-01999-9.
47. Raeeszadeh M, Adeli B. A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. *ACS Photonics.* 2020, *7*(11):2941–2951. DOI:10.1021/acsp Photonics.0c01245.
48. Bolton, J. R.; Cotton, C. A. *The Ultraviolet Disinfection Handbook*; American Water Works Association, 2008. Denver, CO 80235, USA.
49. Chapman S. XXXV. On Ozone and Atomic Oxygen in the Upper Atmosphere. *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* 1930, *10*:369-383. Published online: 03 Apr 2009. DOI: 10.1080/14786443009461588.

50. Nardell, E.; Vincent, R.; Sliney D.H. Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) for Air Disinfection: A Symposium in Print. *Photochem Photobiol.* 2013, 89, 4 DOI:10.1111/php.12098.
51. Liu, G.; Xiao, M.; Zhang, X.; Gal, C.; Chen, X.; Liu, L.; Pan, S.; Wu, J.; Tang, L.; Clements-Crome, D. A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustainable Cities and Society.* 2017, 32:375-396. DOI: 10.1016/j.scs.2017.04.011
52. Lin, W. Y.; Chang, Y. Y.; Lien, C. T.; Kuo, C. W. Separation characteristics of submicron particles in an electrostatic precipitator with alternating electric field Corona charger. *Aerosol Sci. Technol.* 2011, 45:393-400.
53. Staszowska, A. Assessment of the air purifier effectiveness under model conditions. *Journal of Physics: Conference Series,* 2021, 1736. DOI:10.1088/1742-6596/1736/1/012043
54. Lee, J.H., Kim, J.Y., Cho, B.B. et al. Assessment of air purifier on efficient removal of airborne bacteria, *Staphylococcus epidermidis*, using single-chamber method. *Environ Monit Assess* 2019, 191:720. DOI: 10.1007/s10661-019-7876-3
55. Prehn F.; Timmermann E.; Kettlitz M.; Schauler K.; Günther S.; Hahn V. Inactivation of airborne bacteria by plasma treatment and ionic wind for indoor air cleaning. *Plasma Process Polym.* 2020; 17:e2000027. <https://doi.org/10.1002/ppap.202000027>
56. Amit Vohra, D.Y. Goswami, D.A. Deshpande, S.S. Block. Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air. 2006. *Applied Catalysis B: Environmental*, 64, 1-2:57-65, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.10.025>.
57. Mitoraj, D.; Jańczyk, A.; Strus, M.; Kisch, H.; Stochel, G.; Heczko, P.B.; Macyk, W. Visible light inactivation of bacteria and fungi by modified titanium dioxide. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2007,6. DOI:10.1039/B617043A.
58. Sánchez, B.; Sánchez-Muñoz, M.; Muñoz-Vicente, M.; Cobas, G.; Portela, R.; Suárez, S.; González, A.E.; Rodríguez, N.; Amils, R. Photocatalytic elimination of indoor air biological and chemical pollution in realistic conditions, *Chemosphere.* 2012, 87(6): 625-630. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.01.050.
59. Guimera, D.; Trzil J.; Joynor J.; Hysmith M.D. Effectiveness of a shielded ultraviolet C air disinfection system in an inpatient pharmacy of a tertiary care children's hospital, *Am. J. Infect. Control.* 2018, 46(2):223-225. DOI: 10.1016/j.ajic.2017.07.026.
60. Kujundzic, E.; Matalkah, F.; Howard, C. J.; Hernandez, M.; Miller, S. L. UV Air Cleaners and Upper-Room Air Ultraviolet Germicidal Irradiation for Controlling Airborne Bacteria and Fungal Spores, *J. Occup. Environ. Hyg.* 2006, 3(10):536-546. DOI: 10.1080/15459620600909799.
61. Nardell, E. A.; Brickner, P. W. Tuberculosis in New York City:focal transmission of an often fatal disease. *JAMA* 1996, 276 (15):1259-60. DOI:10.1001/jama.1996.03540150061032.
62. Tseng C.-C.; Li C.-S. Inactivation of Virus-Containing Aerosols by Ultraviolet Germicidal Irradiation. *Aerosol Sci. Technol.* 2005, 39(12):1136-1142. DOI:10.1080/02786820500428575.
63. Peccia J.; Werth H. M.; Miller S.; Hernandez M. Effects of Relative Humidity on the Ultraviolet Induced Inactivation of Airborne Bacteria. *Aerosol Sci. Technol.* 2001, 35, DOI: 728.10.1080/02786820152546770.
64. Tan L.; Ma B.; Lai X.; Han L.; Cao P.; Zhang J.; Fu J.; Zhou Q.; Wei S.; Wang Z.; Peng W.; Yang L.; Zhang X. Air and Surface Contamination by SARS-CoV-2 Virus in a Tertiary Hospital in Wuhan, China. *Int. J. Infect. Dis.* 2020, 99. DOI: 3.10.1016/j.ijid.2020.07.027.
65. Tseng C.-C.; Li C.-S. Inactivation of Virus-Containing Aerosols by Ultraviolet Germicidal Irradiation. *Aerosol Sci. Technol.* 2005, 39 (12):1136-1142. DOI:10.1080/02786820500428575.
66. Trusz A., "Redukcja zanieczyszczenia mikrobiologicznego w pomieszczeniach z zastosowaniem lampy przepływowej z promieniowaniem UV-C," *INSTAL*, vol. 12, pp. 36-40, 2021, doi: 10.36119/15.2021.12.5.
67. ECDC: Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update. 10 November 2020. Available from: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/heating-ventilation-air-conditioning-systems-covid-19>
68. Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). CORONAVIRUS, SARS-COV-2, COVID-19 AND HVAC SYSTEMS 2020 [https://www.cibse.org/coronavirus\(covid-19\)/coronavirus-covid-19-and-hvac-systems](https://www.cibse.org/coronavirus(covid-19)/coronavirus-covid-19-and-hvac-systems)
69. United States Environmental Protection Agency. Indoor Air in Homes and Coronavirus (COVID-19) 2020; Available from: <https://www.epa.gov/coronavirus/indoor-air-homes-and-coronavirus-covid-19>
70. Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA). COVID-19 Guidance Document [updated 3 August 2020]. Available from: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf
71. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ASHRAE position document on infectious aerosols Atlanta: ASHRAE, 2020. Available from: https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf
72. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Guidance for Building Operations During the COVID-19 Pandemic. *ASHRAE Journal*, May 2020; Available from: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/ashrae%20journal/2020journaldocuments/72-74_ieq_schoen.pdf

