

Organizacja wymiany powietrza w pomieszczeniach bytowych w czasach zarazy

Air distribution system in rooms in the time of the plague

WOJCIECH CEPIŃSKI, PAWEŁ SZALAŃSKI, JACEK MISIŃSKI

DOI 10.36119/15.2022.12.6

W artykule wskazano czynniki zwiększające i zmniejszające zagrożenie transmisją patogenu drogą powietrzną w pomieszczeniu na przykładzie doświadczeń z SARS-CoV-2. W szczególności omówiono wpływ organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniach bytowych na ryzyko transmisji patogenu, w sytuacjach niebezpiecznych – obecności chorego, który może stanowić potencjalne źródło zakażenia. Przeanalizowano stosowane powszechnie systemy organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniach pod kątem możliwości rozprzestrzenienia się zanieczyszczeń bądź patogenów i ich skutecznego usuwania bądź eliminowania. Pod uwagę wzięto również wpływ urządzeń, takich jak: klimatyzatory, przenośne wentylatory i oczyszczacze powietrza. Wskazano rozwiązania najbardziej korzystne, zgodne z nowym paradygmatem projektowania bezpiecznych instalacji, wynikającym z pandemii koronawirusa.

Słowa kluczowe: koronawirus, SARS-CoV-2, COVID-19, wentylacja, HVAC

The article indicates factors that increase and decrease the risk of airborne transmission of the pathogen in the room, using the SARS-CoV-2 experience as an example. In particular, the influence of the organization of air exchange in rooms on the risk of pathogen transmission was discussed, in dangerous situations – the presence of a sick person who may be a potential source of infection. Commonly used systems of organization of air exchange in rooms were analysed in terms of the possibility of the spread of contaminants or pathogens and their effective removal or elimination. The influence of devices such as air conditioners, portable fans and air purifiers was also considered. The most favourable solutions were identified, in line with the new paradigm of designing safe installations resulting from the coronavirus pandemic.

Keywords: coronavirus, SARS-CoV-2, COVID-19, ventilation, HVAC

Wprowadzenie

Doświadczenia obecnej pandemii SARS-CoV-2 i choroby COVID-19 powinny skłonić do nowego, innego podejścia do standardów projektowania układów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych (ogólnie HVAC) szczególnie w budynkach niebędących obiektami służby zdrowia.

Wiele instytucji w czasie pandemii wskazywało doraźne działania mające na celu poprawę bezpieczeństwa funkcjonowania układów wentylacyjnych [1–19]. W nowszych publikacjach prawdopodobieństwo infekcji w różnych typach pomieszczeń ujęto ilościowo, z uwzględnieniem wentylacji i innych czynników [20–24]. Powyższe wykazało problemy, które generują potrzebę wprowadzenia zmian w wytycznych projektowych i użytkowych.

Słuszne wydaje się zatem przyjęcie nowego paradygmatu i wprowadzenie odpowiednich wytycznych, postulowanych

w publikacji profesor L. Morawskiej [25], a w związku z tym także konieczne jest wskazywanie najkorzystniejszych rozwiązań spośród obecnie wykorzystywanych.

Wpisując się w tę potrzebę, wcześniej w [26], omówiono kwestię lokalizacji filtrów w instalacji wentylacyjnej i ich skuteczności w warunkach pandemii. Stworzenie nowego paradygmatu projektowania wymaga jednak przeanalizowania szeregu innych kwestii. W niniejszym artykule zajęto się zagadnieniem organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu. Jedną z ról systemów wentylacyjnych, poza zapewnieniem odpowiednich warunków mikroklimatu, jest dostarczanie do pomieszczeń czystego powietrza zewnętrznego i usuwanie lub rozrzedzanie zanieczyszczeń w powietrzu wewnętrznym.

W sytuacji zagrożenia niebezpiecznymi zanieczyszczeniami powietrza wewnętrznego znaczenie systemu organizacji wymiany powietrza jest większe niż

w sytuacji, gdy takie zagrożenie nie występuje. Typowe rozwiązania stosowane w pomieszczeniach, w których takich zanieczyszczeń nie ma, po wzięciu pod uwagę możliwości emisji i rozprzestrzeniania się zakaźnych wirusów (np.: SARS-CoV-2) mogą okazać się niekorzystne. Potrzebne wydaje się być inne spojrzenie na projektowanie układów wentylacyjnych, dla pomieszczeń, w których w normalnych sytuacjach niebezpieczne zanieczyszczenia nie występują.

Celem artykułu jest wskazanie:

- korzyści i problemów wynikających z poszczególnych systemów organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniach w kontekście rozprzestrzeniania zanieczyszczeń,
- rekomendowanych rozwiązań ograniczających ryzyko rozprzestrzenienia się patogenów w pomieszczeniu i jednocześnie dających możliwość szybkiej modyfikacji.

dr inż. Wojciech Cepiński <https://orcid.org/0000-0003-4294-0431>; dr inż. Paweł Szalański <https://orcid.org/0000-0001-9263-3486>; dr inż. Jacek Misiński <https://orcid.org/0000-0002-9038-7469> – Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, Wrocław.
Adres do korespondencji/ Corresponding author: pawel.szalanski@pwr.edu.pl

Możliwości ograniczenia zagrożenia transmisją wirusa w pomieszczeniu

Możliwości transmisji patogenów chorobotwórczych wewnątrz pomieszczenia są szeroko opisywane w literaturze [27–33].

Rozpatrując zagrożenia związane z transmisją różnego rodzaju patogenów chorobotwórczych w pomieszczeniu drogą powietrzną, należy wziąć pod uwagę [1–19]:

- parametry powietrza w pomieszczeniu,
- system organizacji wymiany powietrza:
 - strumień powietrza wentylującego,
 - krotkość wymian powietrza zewnętrznych,
 - efektywność wentylacji,
 - kierunki przepływu powietrza przez pomieszczenie,
 - zasięg strug nawiewnych, rozmieszczenie wywiewników,
 - zagęszczenie, rozmieszczenie i rodzaj aktywności osób w pomieszczeniu.

Powyższe czynniki mogą mieć różny wpływ na ryzyko transmisji i powodować, że zjawisko to będzie:

- zwiększać zagrożenie transmisją wirusa,
- neutralne w tej kwestii,
- zabezpieczać przed tą transmisją.

W tabeli 1 przedstawiono najczęściej występujące czynniki w obrębie pomieszczenia zwiększające zagrożenie transmisją wirusa związane z systemem wentylacyjnym i takie, które powodują zwiększenie poziomu bezpieczeństwa.

Tabela 1. Czynniki zwiększające zagrożenie transmisją oraz zwiększające poziom bezpieczeństwa w pomieszczeniu

Table 1. Factors that increase the danger of transmission and increase the level of security in the room

czynniki zwiększające zagrożenie	czynniki zwiększające bezpieczeństwo
<ul style="list-style-type: none"> • duże zagęszczenie ludzi – wysoka emisja wirusów • mała krotkość wymian – duża ilość wirusów w powietrzu wewnętrznym • niekontrolowane rozprzestrzenianie wirusa w pomieszczeniu • niska efektywność wentylacji 	<ul style="list-style-type: none"> • małe zagęszczenia ludzi – niska emisja wirusów • duża krotkość wymian – mała ilość wirusów w powietrzu wewnętrznym • usuwanie wirusów możliwie blisko miejsca emisji – odpowiednia organizacja wymiany powietrza • wysoka efektywność wentylacji

W artykule dokładniej przeanalizowano wpływ powyższych czynników, ze szczególnym uwzględnieniem organizacji wymiany powietrza i związanej z nią efektywnością wentylacji, a także parametrów powietrza w pomieszczeniu, na możliwość transmisji patogenów drogą powietrzną w pomieszczeniu.

Parametry powietrza w pomieszczeniu

Systemy wentylacyjne i klimatyzacyjne są odpowiedzialne za kształtowanie parametrów powietrza w pomieszczeniu. Zalecana temperatura i wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu zapewniające

względny komfort cieplny to, w zależności od temperatury zewnętrznej, $20 \pm 26^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej powietrza $40 \pm 60\%$ [27].

W powietrzu wewnętrznym mogą znajdować się różne patogeny (bakterie, wirusy, pierwotniaki, grzyby, pleśnie), zanieczyszczenia biologiczne (pyłki powodujące alergię, astmę itp.), które mogą stanowić źródło chorób przenoszonych drogą powietrzną, wirusowych: grypa, ospa wietrzna, różyczka, COVID-19, bakteryjnych: gruźlica, Legionelloza czy grzybiczych: aspergilloza, kandydoza.

Na przykładzie SARS-CoV-2, przy parametrach powietrza ze wspomnianego wyżej zakresu stwierdzono wysoką stabilność wirusa w aerozolu [28]. Przy temperaturze 4°C wirus jest on stabilny przez 14 dni, a podniesienie temperatury do 70°C skraca czas dezaktywacji wirusa do 5 min [29]. Niestety środowisko niesprzyjające koronawirusom (na przykładzie wirusa MERS) to powietrze o wilgotności względnej powyżej 30°C [30]. Według [34] w przypadku SARS-CoV-2 trwałość wirusa warunkach $10^\circ\text{C}/40\%$, wynosi dobę, a w $27^\circ\text{C}/65\%$ jedynie 90 minut. Utrzymanie takich poziomów temperatury i wilgotności w pomieszczeniach może być nieakceptowalne, ponieważ powoduje znaczne zaburzenie komfortu cieplnego i złe samopoczucie użytkowników. Dla wielu mogą to być warunki wybitnie szkodliwe, zwłaszcza dla osób z tzw. „chorobami współistniejącymi”.

Istotną kwestią jest również czystość i jakość powietrza. Należy pamiętać, że

głównym źródłem grubych (PM10; średnica aerodynamiczna $10 \mu\text{m}$) i drobnych (PM2.5; średnica aerodynamiczna $2.5 \mu\text{m}$) cząstek stałych (PM) może ułatwić przenoszenie się kropli i cząstek wirusa SARS-CoV-2 w środowisku wewnętrznym.

Zimą, w typowych pomieszczeniach bez możliwości nawilżania powietrza, wilgotność względna może spaść do wartości $10 \pm 20\%$. Powoduje to ryzyko wysychania błon śluzowych i zwiększenia podatności na wnikanie przez nie patogenu. Wiele wirusów i bakterii ma zwiększoną żywotność w warunkach niskiej wilgotności względnej, a ludzki organizm jest mniej zdolny do obrony przed patogenami w suchym i zimnym powietrzu. W związku z tym [1], [7] korzystne wydaje się zapewnienie możliwości podnoszenia wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu drogą nawilżania przynajmniej do wilgotności względnej rzędu $20 \pm 30\%$, a najlepiej nawet do 40% , ze względu na wolniejszą dezaktywację wirusa SARS-CoV-2 poniżej tej wartości [35]. Wpisuje się to w obecnie obowiązujące zapisy rozporządzenia dotyczącego bezpieczeństwa i higieny pracy [36], w którym zapisano, że wilgotność względna powietrza w pomieszczeniach przeznaczonych do pracy z monitorem ekranowym nie powinna być niższa niż 40% . Ponadto, według polskich przepisów (norma [37] powołana w rozporządzeniu [38]) zalecana jest wartość wilgotności względnej od 40 do 60% .

W okresach upałów pomieszczenia nie powinny być nadmiernie chłodzone, gdyż układy chłodnicze nastawione na niskie parametry czynnika wysuszają powietrze i mogą spowodować nadmierne obniżenie wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach poniżej 40% . Jednak w warunkach klimatycznych Polski ryzyko wystąpienia takiej sytuacji nie jest wysokie.

Zatem z jednej strony właściwie przyjęte parametry powietrza w pomieszczeniu mogą utrudniać rozprzestrzenianie się patogenów i powodować ich szybką dezaktywację i unicestwienie, jednocześnie wzmacniać mechanizmy obronne człowieka. Oba te czynniki należy wykorzystywać do redukcji prawdopodobieństwa infekcji, dlatego układ wentylacyjny powinien mieć taką możliwość.

Zagęszczenie osób w pomieszczeniu

Konieczność zmniejszenia zagęszczenia osób w pomieszczeniu jest oczywista w celu obniżenia emisji i stężenia cząstek przenoszących wirusa w powietrzu. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia wpływu masowości zakażenia na rozwój

wysokie stężenia CO_2 , obecność lotnych związków organicznych i pyłu (mogących przenosić patogeny) mają nie tylko negatywny wpływ na komfort ludzi, ale są również szkodliwe dla zdrowia i zmniejszają odporność organizmu. Wyniki większości badań zebranych w przeglądzie [32] wskazują, że przewlekła ekspozycja na niektóre zanieczyszczenia powietrza może prowadzić do cięższych i powodujących wyższą śmiertelność na COVID-19 i opóźniać/komplikować powrót do zdrowia pacjentów cierpiących na tę chorobę. W [33] wskazano, że nawykowe spalanie kadzidełka w pomieszczeniach, które jest

choroby. Zmniejszenie liczby osób w pomieszczeniu, w odniesieniu do powierzchni lub kubatury, jest również istotne z punktu widzenia obniżenia zagrożenia przeniesienia wirusa drogą kropelkową i powietrzną.

W [1], [7], [19] zaleca się zmniejszenie zagęszczenia osób przebywających w pomieszczeniach i zachowanie zwiększonego dystansu pomiędzy osobami (2 ÷ 3 m) w celu zmniejszenia lokalnych stężeń zanieczyszczeń powietrza i zwiększenia efektu czyszczącego wentylacji oraz dodatkowo zmniejszenia ryzyka bezpośredniego zakażenia. Określenie miejsc, w których ludzie nie powinni przebywać i wynikająca z tego redukcja liczby osób w pomieszczeniu, powinna uwzględniać system wymiany powietrza.

Aranżowanie pomieszczeń powinno odbywać się przy współpracy projektantów instalacji i architektów, tak aby wykorzystywać ich powierzchnie i kubatury z uwzględnieniem konieczności zapewnienia właściwego przepływu powietrza i wentylowania poszczególnych stref. Inaczej powinno podchodzić się do stref, gdzie ludzie przebywają na stałych miejscach pracy, a inaczej do stref, w których się poruszają.

Krotność wymian powietrza zewnętrznego

Czas usuwania zanieczyszczeń z pomieszczeń jest odwrotnie proporcjonalny do liczby wymian powietrza w pomieszczeniu, a zmniejszenie ilości patogenów oraz czasu ekspozycji obniża ryzyko zakażenia.

Zgodnie z zaleceniami ASHRAE [8], REHVA [1], [7], [9], [10], [11] NIZP-PZH [19], w warunkach zagrożenia zakażeniem koronawirusem, strumienie powietrza wentylującego, a w szczególności powietrza zewnętrznego nie powinny być zmniejszane, a wręcz należy dążyć do intensyfikacji wentylacji. Dlatego żadne działania nie powinny powodować zmniejszenia strumienia powietrza zewnętrznego.

Podstawową kwestią poruszaną w literaturze i zaleceniach [1], [7], [9], [10], [11], [8], [19], [39], [5] jest konieczność zapewnienia wysokiej krotności wymian powietrza zewnętrznego w pomieszczeniach. Należy mieć na uwadze, że krotność ta jest wskaźnikiem i wiąże się z wartością strumienia powietrza zewnętrznego zależną od objętości pomieszczenia wentylowanego. W tym przypadku krotność wymian odnosi się do powietrza zewnętrznego (czystego), a nie do powietrza usuwanego z pomieszczenia. Zwiększanie tego strumienia ma na celu zwiększenie

efektu rozcieńczenia zanieczyszczeń mikrobiologicznych w powietrzu wewnętrznym. Im ten strumień większy tym stężenie końcowe mniejsze, lecz nie może ono osiągnąć wartości zerowej.

Należy jednak pamiętać, że wielkość strumienia nie jest jedynym parametrem decydującym o stężeniu końcowym zanieczyszczeń. Dla danej krotności wymian, wybiera się odpowiednią organizację wymiany powietrza dla uzyskania maksymalnej efektywności wentylacji.

Efektywność wentylacji

Rozpatrując powyższe należy pamiętać, że w samym pomieszczeniu wymiana powietrza nie następuje w sposób doskonały. Zależnie od systemu organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu występują strefy lepiej bądź gorzej wentylowane. Należy mieć również na uwadze, że wymiana powietrza w pomieszczeniu i wymiana powietrza w strefie przebywania ludzi nie są tożsame, a z punktu widzenia ryzyka transmisji patogenów drogą powietrzną najistotniejsza jest skuteczna wymiana powietrza w strefie przebywania i oddychania ludzi. Systemy organizacji wymiany powietrza (rysunki 3-8), z punktu widzenia ryzyka rozprzestrzeniania się patogenów w pomieszczeniu i ich usuwania z pomieszczenia, warto rozpatrywać biorąc pod uwagę również podawane w literaturze [40], [41] wskaźniki efektywności wentylacji.

Efektywność wentylacji definiowana jest jako zależność między wartościami stężenia zanieczyszczeń w powietrzu nawiewanym, w powietrzu wywiewanym i powietrzu wewnętrznym w strefie oddychania (wewnątrz strefy przebywania ludzi) [40], [41]:

$$\varepsilon_v = \frac{C_{ETA} - C_{SUP}}{C_{IDA} - C_{SUP}}$$

gdzie:

- ε_v – efektywność wentylacji,
- C_{ETA} – stężenie danego zanieczyszczenia w powietrzu wywiewanym,
- C_{IDA} – stężenie danego zanieczyszczenia w powietrzu wewnętrznym w strefie

oddychania (w strefie przebywania ludzi),

C_{SUP} – stężenie danego zanieczyszczenia w powietrzu nawiewanym.

Przykładowe wartości, zależne od organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu oraz różnicy temperatur powietrza nawiewanego i powietrza w strefie przebywania ludzi, zaczerpnięte z [41] przytoczono w tabeli 2.

Skupienie się, przy konfigurowaniu systemów organizacji wymiany powietrza, tylko na realizacji parametrów komfortu, może spowodować, że zostaną one osiągnięte, natomiast system nie będzie doskonały z punktu widzenia usuwania zanieczyszczeń. Ten sam system organizacji wymiany powietrza realizujący różne funkcje: chłodzenie, ogrzewanie lub jedynie wentylacja, może charakteryzować się różnymi wartościami efektywności ε_v .

Organizacja wymiany powietrza

Ruch powietrza w pomieszczeniu wywołują głównie nawiewniki, a wywiewniki mają niewielki wpływ na przemieszczanie się powietrza w pomieszczeniu. Ich lokalizacja jest istotna z punktu widzenia wychwytywania zanieczyszczeń. Nawiewniki mogą wywoływać burzliwy przepływ powietrza nawiewanego charakteryzujący się intensywnym mieszaniem z zanieczyszczonym powietrzem w pomieszczeniu (wentylacja mieszająca) lub quasi-laminarny – spychający zanieczyszczenia w kierunku otworów wywiewnych (wentylacja wyporowa i tłokowa). W pierwszym przypadku wentylacja dąży do wyrównania stężenia zanieczyszczeń w całej przestrzeni wentylowanej, w drugim zaś stężenie to rośnie na drodze od nawiewników do wywiewników. Nieodpowiednie rozmieszczenie nawiewników może powodować powstawanie stref stagnacji o większym stężeniu zanieczyszczeń. Dodatkowo może się pojawić zakłócenie ruchu powietrza wentylującego przez zjawisko konwekcji lub oddziaływanie strug nawiewanych przez urządzenia pracujące na powietrzu obiegowym.

Przepływ powietrza pomiędzy ludźmi wymuszony przez wentylację może być

Tabela 2. Wskaźniki efektywności wentylacji

Table 2. Factors that increase the danger of transmission and increase the level of security

wentylacja mieszająca				wentylacja wyporowa		nawiew miejscowy	
góra-góra		góra-dół		dół-góra			
$t_{SUP} - t_{IDA}$	ε_v	$t_{SUP} - t_{IDA}$	ε_v	$t_{SUP} - t_{IDA}$	ε_v	$t_{SUP} - t_{IDA}$	ε_v
< 0	0,9 ÷ 1,0	< - 5	0,9	< 0	1,2 ÷ 1,4	-6	1,2 ÷ 2,2
0 ÷ 2	0,9	-5 ÷ 0	0,9 ÷ 1,0	0 ÷ 2	0,7 ÷ 0,9	-3	1,3 ÷ 2,3
2 ÷ 5	0,8	> 0	1	> 2	0,2 ÷ 0,7	0	1,6 ÷ 3,5
> 5	0,4 ÷ 0,7						

t_{IDA} – temperatura powietrza wewnętrznego w strefie oddychania (w strefie przebywania ludzi),

t_{SUP} – temperatura powietrza nawiewanego.

niekorzystny z punktu widzenia rozprzestrzeniania się patogenów (rysunek 1 a, b, c). Istotną jest zatem wzajemna lokalizacja osób w pomieszczeniu w powiązaniu ze sposobem organizacji wymiany powietrza. Niekorzystne kształtowanie rozpyłów powietrza w stosunku do rozmieszczenia osób może wpływać na łatwiejsze rozprzestrzenianie się patogenu w pomieszczeniu i większą ekspozycję osób w nim przebywających. Dlatego uwzględnić należy nie tylko nawiewniki i wywiewniki przewodowego systemu wentylacyjnego, ale również strugi powietrza z urządzeń bezprzewodowych, takich jak klimakonwektory [42], wentylatory indywidualne i coraz powszechniejsze oczyszczacze. Wynika to z faktu, że jednym z istotnych czynników mogących sprzyjać rozprzestrzenianiu patogenów zawieszonych w powietrzu jest

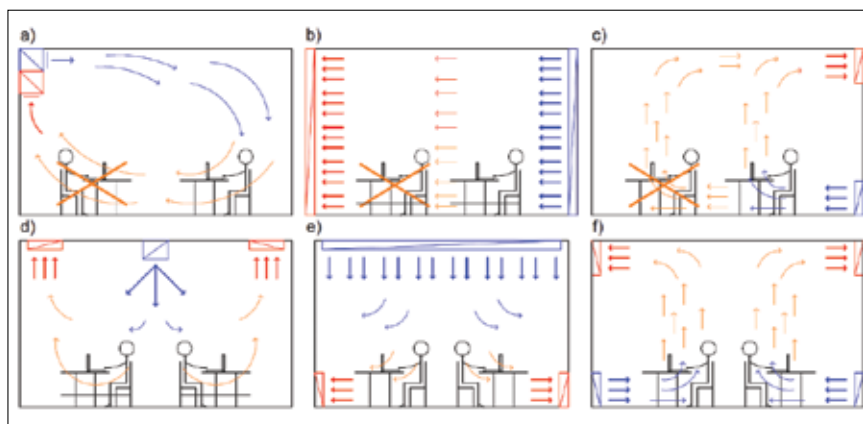
- rozmieszczenie ludzi,
 - elementów nawiewnych, wywiewnych (rysunek 1 i 2),
 - klimatyzatorów i przenośnych urządzeń wentylacyjnych (rysunki 3, 4 i 5),
 - elementy wyposażenia wnętrz i wydzielen (rysunek 6),
- w obsługiwanych przez nie pomieszczeniach można uznać za mniej lub bardziej niekorzystne z punktu widzenia prawdopodobieństwa transmisji patogenów. Dokonując tego podziału, na rysunkach od 1 do 6, jako nadrzędny cel przyjęto konieczność usuwania zanieczyszczeń na naturalnej ich drodze bez ich rozprzestrzeniania po całym pomieszczeniu, a w szczególności między osobami.

W instalacjach z dwustopniową obróbką powietrza (na przykład klimakonwektory w pomieszczeniach) mamy do

czynienia z minimalnym przepływem powietrza zewnętrznego (minimalny strumień higieniczny) przez pomieszczenie i dużą wewnętrzną cyrkulacją powietrza przez klimakonwektory. Urządzenia strefowe mieszają powietrze i mogą powodować niekontrolowane rozprzestrzenianie patogenu w pomieszczeniach. Ustalenie lokalizacji, sposobu działania i wpływu z nich powietrza powinno być przemyślane. Na rysunku 3 przedstawiono następujące przykłady niekorzystnego i akceptowalnego, z punktu widzenia rozprzestrzeniania zanieczyszczeń, umieszczenia klimakonwektora ściennego i ukierunkowania strugi powietrza z niego pochodzącej:

- a) powietrze zasysane przez klimakonwektor może pochodzić od obu użytkowników co sprzyja rozprzestrzenianiu potencjalnie wydychanego patogenu od jednego z użytkowników do drugiego,
- b) struga z klimakonwektora będzie powodować przemieszczanie powietrza wydychanego przez jednego użytkownika do strefy, w której przebywa drugi,
- c) maksymalne zindywidualizowanie klimakonwektorów – w sytuacji tej ważna jest prędkość wypływu powietrza z klimakonwektora, im mniejsza tym korzystniejsza.

Oczyszczanie tylko powietrza zewnętrznego, przy emisji patogenów wewnątrz pomieszczenia, nie jest wystarczające. Dlatego w klimakonwektorach, jeżeli to możliwe, można rozważyć wymianę typowych filtrów na elementy skuteczniej oczyszczające lub/i sterylizujące powietrze (lampy UV, jonizatory plazmowe, filtry



Rysunek 1. Schematy ideowe podstawowych systemów organizacji wymiany powietrza: mieszający (a, d), tłokowy (b, e) i wyporowy (c, f). Przypadki niekorzystne (a, b, c) i akceptowalne (d, e, f) z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

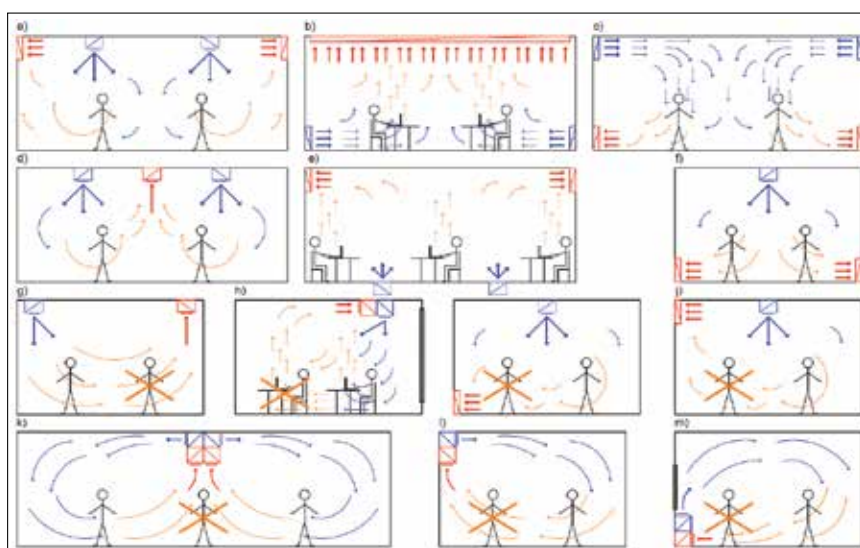
Figure 1. Outline diagrams of basic air exchange systems, mixing (a, d), piston (b, e) and displacement (c, f). Unfavourable (a, b, c) and acceptable (d, e, f) cases due to pollutants spreading

dużą prędkość i kierunek ruchu powietrza cyrkulującego w pomieszczeniu.

Przykłady różnych systemów organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu ze wskazaniem systemów niekorzystnych i akceptowalnych przedstawiono w sposób schematyczny na dwuwymiarowych rysunkach od 1 do 6, lecz rozpatrując konkretne przypadki projektowe należy je analizować przestrzennie, a najlepiej przy wykorzystaniu narzędzi modelowania CFD (ang. Computational Fluid Dynamics).

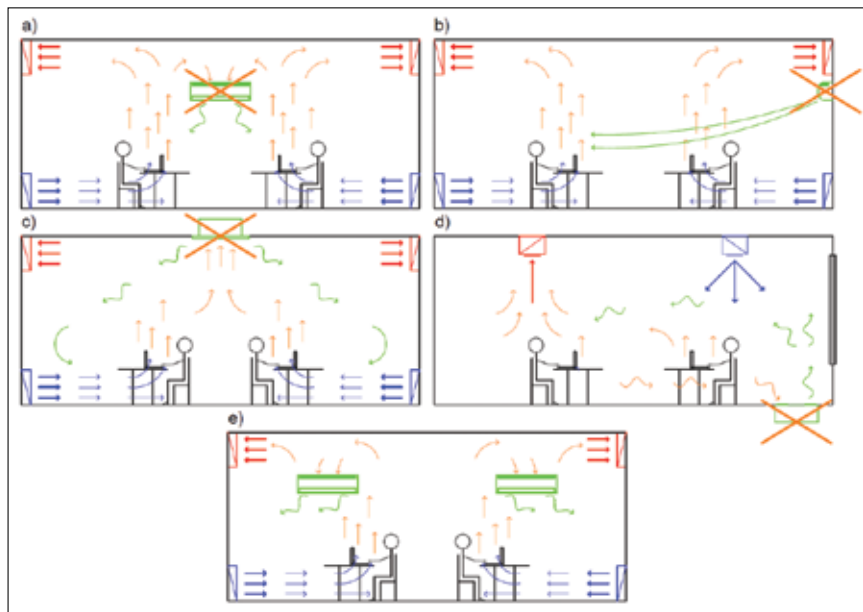
Można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje przepływu powietrza przez pomieszczenia wentylowane: wyporowy, mieszający i tłokowy (rysunek 1). Systemy organizacji wymiany powietrza mogą działać w układzie „góra-góra”, „góradół”, „dół-góra” i „dół-dół” (rysunek 2).

Zasadniczo w każdym z wyżej wymienionych rodzajów są układy, które ze względu na:

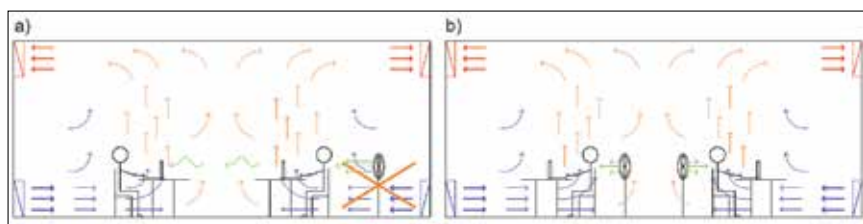


Rysunek 2. Różne przypadki systemów organizacji wymiany powietrza z podziałem na niekorzystne i akceptowalne z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

Figure 2. Various cases of air exchange systems with a division into unfavourable and acceptable ones in terms of spreading of pollutants



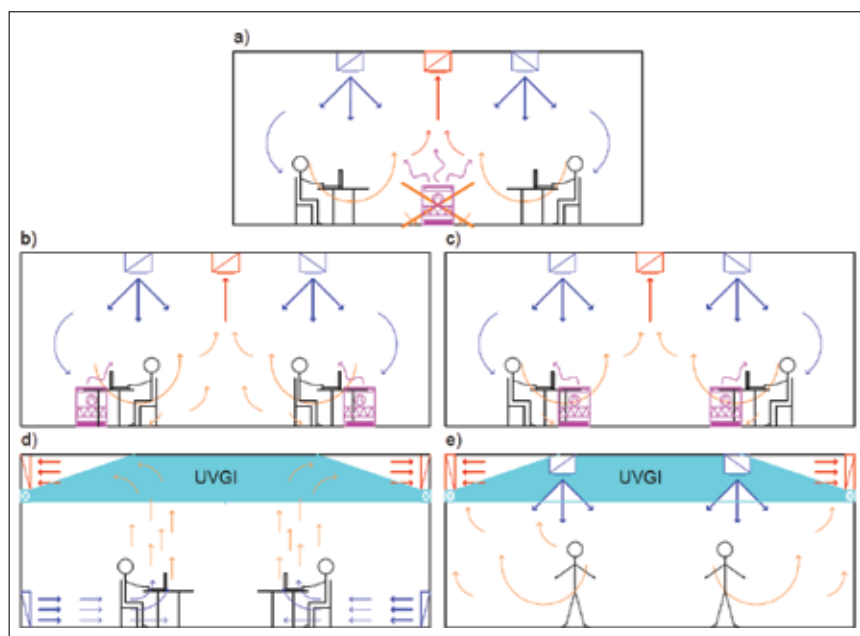
Rysunek 3.
Różne przypadki umieszczenia klimakonwektorów ściennych, niekorzystnie (a, b, c, d) i akceptowalnie (e) z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń
Figure 3. Various locations of high wall fancoil units, unfavorable (a, b, c, d) and acceptable (e) in terms of the spread of pollutants



Rysunek 4.
Różne przypadki umieszczenia wentylatorów przenośnych, nieakceptowalne (a) i akceptowalne z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń (b)
Figure 4. Various locations of portable fans, unacceptable (a) and acceptable from the point of view of spreading of pollutants (b)

węglowe, filtry elektrostatyczne, filtry nasyczone wyciągami roślinnymi – biofiltry, filtry fotokatalityczne, filtry antybakteryjne z jonami srebra itp.). Należy spodziewać się badań nowych technologii filtracji w celu zwiększenia skuteczności zatrzymywania koronawirusa, np.: [66]. Stosując tego typu urządzenia należy uwzględnić fakt, że niektóre z tych technologii mogą generować niebezpieczne dla ludzi substancje (np.: H_2O_2 , O_3) lub czynniki (promieniowanie UV). Dlatego należy je stosować w sposób uniemożliwiający ekspozycję ludzi na te czynniki w stopniu im zagrażającym.

Analogiczne zasady warto również wykorzystać w kwestii umieszczania przenośnych wentylatorów oraz prędkości powietrza z nich wypływającego (rysunek 4). W sytuacji a) struga z wentylatora będzie powodować przemieszczanie powietrza wydychanego przez jednego użytkownika do strefy, w której przebywa drugi. Sytuację, może poprawić poprzez zastosowanie dodatkowego wentylatora,



Rysunek 5.
Różne przypadki umieszczenia przenośnych oczyszczaczy powietrza, nieakceptowalnie (a) i akceptowalnie (b, c, d, e) z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń
Figure 5. Various locations of portable air purifiers, unacceptable (a) and acceptable (b, c, d, e) in terms of spreading of pollutants

przesunięcie wentylatorów bliżej użytkowników i obniżenie ich prędkości na niższy bieg (b). Interesujące jest również stosowanie przenośnych wentylatorów wyposażonych w urządzenia do dezaktywacji bądź eliminacji patogenów, na przykład lampy UV lub jonizatory.

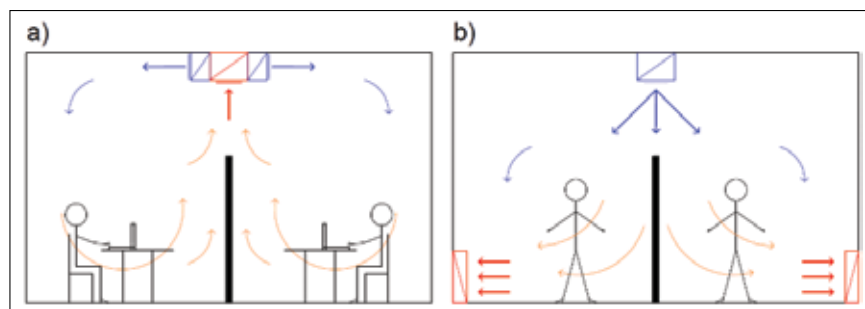
Podobnie lokalizacja przenośnych oczyszczaczy powietrza w pomieszczeniu, również nie jest bez znaczenia (rysunek 5). Nie powinno się kierować strugi z takiego urządzenia do wywiewnika (a). Oczyszczone powietrze powinno trafić z powrotem do pomieszczenia (b) a nie być usuwane z budynku (a), ponieważ rolą oczyszczacza jest ochrona osób w pomieszczeniu. Powinno się je lokalizować w pobliżu osób, żeby z jednej strony oczyszczać potencjalnie zakażone wydychane powietrze najbliższej źródła zanieczyszczenia (chorego) i jednocześnie oczyszczać powietrze w okolicy człowieka w sytuacji, gdyby patogen znajdował się w powietrzu w pomieszczeniu i pochodził od innych osób. Kierując strugę powietrza z wysokosprawnego oczyszczacza na użytkownika (oczyszczacz osobisty) można uzyskać podobne efekty jak przy nawiewie lokalizującym (tabela 2). Skierowanie powietrza z oczyszczacza do wywiewu ma tylko sens wtedy, kiedy w układzie wentylacyjnym zastosowana jest recyrkulacja, bądź możliwy jest przeciek w centrali, albo chcemy chronić powietrze usuwane. Niewłaściwe jest również sytuowanie oczyszczaczy w miejscu nawiewu powietrza zewnętrznego, gdyż w zamysłu i teoretycznie nie

powinno ono zawierać wirusów. Przy nawiewie można by umieszczać oczyszczacz w sytuacji braku możliwości wykluczenia recyrkulacji powietrza w układzie wentylacyjnym.

Ciekawym rozwiązaniem jest możliwość umieszczenia strefy dezynfekcji w górnej części pomieszczenia przy wykorzystaniu specjalnych lamp UVGI tak zwany system Upper Room (rysunek 5d i 5e), szczególnie dla miejsc o zwiększonym prawdopodobieństwie zachorowania (np.: gabinet lekarski, poczekalnia), zatłoczonych przestrzeni (np. sale, hole), w strefach, gdzie ludzie muszą zdejmować maski, aby jeść lub pić (kawiarnie, restauracje, pomieszczenia socjalne).

Można utrudnić, a nawet uniemożliwić przepływ powietrza pomiędzy osobami poprzez:

- zastosowanie dodatkowych przegród oddzielających (rysunek 6),
- zmianę lokalizacji miejsca pracy,
- obrócenie miejsca pracy (rysunki 3, 4 i 5).



Rysunek 6.

Możliwość redukcji rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w pomieszczeniu poprzez zastosowanie dodatkowych przegród oddzielających

Figure 6. The possibility of reducing the spread of pollution in the room using additional separating sections

Wpływ organizacji wymiany powietrza na prawdopodobieństwo zakażenia

W [43] przedstawiono wyniki analiz prawdopodobieństwa zakażenia dla równoważnych pomieszczeń i przestrzeni. Między innymi porównano salę lekcyjną z systemem organizacji wymiany powietrza góra-dół o efektywności $\epsilon_v = 1,0$ i jednostkowym strumieniem powietrza zewnętrznego $14 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{os})$ oraz restaurację ze znacznie większym jednostkowym strumieniem powietrza zewnętrznego $20 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{os})$ i systemie góra-góra o efektywności $\epsilon_v = 0,8$. Mimo blisko półtora razy większego jednostkowego strumienia powietrza zewnętrznego oraz identycznych założeń dotyczących dystansu pomiędzy użytkownikami i jednoczesności ich przebywania, wyznaczone w obu przypadkach prawdopodobieństwo zakażenia jest bardzo podobne i wyniosło odpowiednio $0,030$ i $0,027$, dla

salii lekcyjnej i restauracji. Pokazuje to, że uwzględnianie efektywności wentylacji ϵ_v może mieć istotne znaczenie przy wyznaczeniu prawdopodobieństwa zakażenia.

Wnioski

Projektując nowe instalacje i układy wentylacyjne oraz klimatyzacyjne w budynkach niebędących obiektami służby zdrowia w kontekście parametrów powietrza w pomieszczeniu i organizacji wymiany powietrza korzystnym z punktu widzenia możliwości zmniejszenia ryzyka transmisji patogenów drogą powietrzną wydają się poniższe działania [1–19].

- Zapewnienie możliwości uzyskiwania temperatury i wilgotności względnej powietrza w szerszych niż typowe granicach, korzystnych z punktu widzenia ograniczenia transmisji (odpowiednie zwiększenie mocy nagrzewnicy i chłodnicy, montaż nawilzacza itp.).
- Stosowanie systemów organizacji wymiany powietrza ograniczających

ska, do którego dopływa powietrze zewnętrzne.

- Aranżowanie miejsc przebywania ludzi w taki sposób, aby:
 - unikać ich przebywania w pobliżu wywiewników zbiorczych,
 - umożliwić ich przebywanie w obszarach, gdzie świeże powietrze jest nawiewane,
 - umożliwić lokalną wentylację i stworzenie oddzielnych stref, na przykład wydzielonych przegradami,
 - móc zastosować dodatkowe przegrody oddzielające, o pełnej lub nie – wysokości.
- Ograniczenie rozwiązań z recyrkulacją powietrza lub jeżeli to możliwe jej eliminacja oraz zastosowanie układów pracujących na powietrzu zewnętrznym z odzyskiem ciepła i bezpieczną konfiguracją wentylatorów. W związku z tym preferowane są centralne układy wentylacyjne/klimatyzacyjne oparte na odzysku ciepła w centrali i pełnym (100%) udziale powietrza wentylującego – zapewniające wysoką krotność wymian powietrza zewnętrznego w pomieszczeniu, a przez to wyższą jakość powietrza wewnętrznego, niż dopuszczalne przepisami [38] układy z recyrkulacją o minimalnym udziale powietrza zewnętrznego 10% [44]. Należy jednak zapewnić możliwość zwiększania udziału powietrza zewnętrznego do 100% w korzystnych warunkach pogodowych zwiększanie udziału powietrza zewnętrznego z ograniczeniami związanymi z mocą nagrzewnicy i chłodnicy [38]. W tym ujęciu układ z dostarczaniem jedynie minimalnych, higienicznych ilości powietrza zewnętrznego i uzdatnianiem powietrza w pomieszczeniu (np.: klimakonwektory z powietrzem higienicznym) jest najmniej korzystny, ze względu na brak możliwości istotnego zwiększenia strumienia powietrza zewnętrznego.
- Projektowanie pracy klimakonwektorów i klimatyzatorów na niższych biegach (blokować wyższe biegi?) i ich lokalizacji w pobliżu indywidualnych użytkowników.
- Uwzględnianie wpływu strug powietrza z klimatyzatorów, klimakonwektorów i urządzeń przenośnych (wentylatory, oczyszczacze powietrza) na wentylację ogólną pomieszczenia.
- Stosowanie urządzeń wyposażonych w możliwość dezynfekcji powietrza (na przykład lampy UV, jonizatory, filtry itp.).

- Zapewnienie możliwości utrzymania ciągłego działania wentylacji, z ewentualnymi obniżeniami wydajności, zamiast wyłączenia w okresach nieobecności ludzi.

Wszystkie powyższe, zalecane działania powinny uwzględniać charakter aktywności osób przebywających w pomieszczeniu, ze stałym miejscem przebywania ludzi (np.: biura, restauracje), albo gdzie ludzie ciągle się przemieszczają (np.: sklepy wielkopowierzchniowe).

Wybranie rozwiązania technicznego realizującego powyższe założenia często nie jest proste i wymaga dogłębnej analizy konkretnego przypadku. Podczas podejmowania tych decyzji warto rozważyć również poniższe kwestie.

Najbardziej groźną sytuacją, z punktu widzenia transmisji patogenów drogą powietrzną, jest przebywanie wielu osób w słabo wentylowanym pomieszczeniu. Niepożądaną jest również sytuacja, kiedy strumień powietrza w pomieszczeniu przepływa pomiędzy osobami. W najgorszym przypadku od chorych do zdrowych. Zatem zarządzanie kierunkiem i prędkością przepływu powietrza na etapie projektowania powinno być gruntownie prześlędane. Z punktu widzenia minimalizacji ryzyka transmisji patogenów drogą powietrzną, korzystne jest, aby nowoprojektowane układy wentylacyjne realizowały:

- 1) możliwość zwiększania wymiany powietrza zewnętrznego w razie wystąpienia takiej potrzeby, które rozcieńcza zanieczyszczenia, ale nie kosztem nieakceptowalnego niedotrzymania parametrów powietrza w pomieszczeniu,
- 2) ograniczenie mieszania powietrza w całej kubaturze, które powoduje roznoszenie patogenów w pomieszczeniu.

Spełnienie założenia 1) można osiągnąć poprzez zapewnienie możliwości zwiększenia wydajności wentylatorów dobranych z odpowiednim nadmiarem. Należy jednak mieć na względzie wzrost hałasu generowanego przez wentylator pracujący na wyższych obrotach. W układach z recyrkulacją zwiększenie krotności wymian powietrza zewnętrznego można również osiągnąć poprzez zmniejszenie ilości zawracanego powietrza wywiewanego. Niezależnie od konfiguracji centrali, w przypadku zwiększenia strumienia powietrza zewnętrznego powyżej wartości projektowanej, wzrośnie wymagana moc nagrzewnicy i chłodnicy powietrza w centrali. Musiałyby zatem być one dobrane z nadmiarem. Pojawia się w konsekwencji potrzeba zwiększenia przepływu lub różnicy temperatury czynnika grzewczego/chłodniczego i powietrza. Przy określaniu wyżej opisanych naddatków

korzystne jest znalezienie kompromisu pomiędzy komfortem cieplnym, a największym możliwym przewietrzaniem pomieszczenia, z uwzględnieniem wymaganego reżimu technologicznego w pomieszczeniu i takie przyjęcie temperatury i wilgotności powietrza, aby nie narazić przebywających w nim osób na obniżenie odporności.

Z punktu widzenia założenia 2), korzystne jest szybkie i skuteczne usuwanie na zewnątrz zakaźnych chmur aerozoli, bezpośrednio z miejsca ich powstawania, a tym samym zapobieganie ich rozprzestrzenianiu. Jednak zasadniczo jest to możliwe, gdy miejsce emisji jest stałe (np.: stałe miejsca pracy). W innym, mniej korzystnym przypadku rozwiązaniem pozostaje rozcieńczanie zwiększonym strumieniem powietrza. Jeżeli nie jest to możliwe, to z punktu widzenia ekspozycji na patogen i masowości zakażenia pojawiają się pytania:

- czy lepiej rozcieńczać zanieczyszczenia mieszając powietrze w pomieszczeniu, co zmniejsza jego koncentrację w całej kubaturze? – długi czas kontaktu, ale małe stężenie patogenu,
- czy nie ograniczać rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń po pomieszczeniu usuwając je w miejscu emisji i godząc się z lokalnie zwiększoną koncentracją patogenu? – krótki czas kontaktu, ale duże lokalne stężenie patogenu.

W odpowiedzi na te pytania mogłyby pomóc szczegółowe analizy rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w pomieszczeniu, z wykorzystaniem modelowania numerycznego.

Podsumowanie

Zakładając, że system wentylacyjny może potencjalnie rozprzestrzenić zanieczyszczenia lub patogeny, konieczne staje się przeciwdziałanie temu zjawisku. Nowoczesne układy wentylacyjne powinny dawać możliwość odpowiedniej reakcji, w momencie pojawienia się zagrożenia.

Warto zwracać uwagę na możliwość wystąpienia podobnych zagrożeń w przyszłości i tak wybierać systemy organizacji wymiany powietrza kształtujące mikroklimat w pomieszczeniach, aby w jak największym stopniu ograniczyć negatywne skutki niewłaściwego funkcjonowania układu wentylacji. Dlatego szczególnie istotne jest również, dostosowanie układu wentylacyjnego oraz organizacji wymiany powietrza, do aranżacji pomieszczeń, co często bywa w praktyce lekceważone.

Nowe, zmodyfikowane standardy projektowe muszą uwzględniać uwidocznione przez pandemię zagrożenia z jednocze-

snym respektowaniem aktualnych wymagań oszczędności i poszanowania energii, przy zapewnieniu odpowiednich warunków mikroklimatu.

LITERATURA

- [1] REHVA, "REHVA COVID-19 guidance document, April 3, 2020".
- [2] Eurovent Middle East, "COVID-19 Recommendations for Air Filtration and Ventilation," 2000.
- [3] Environmental and Modelling Group, "Role of Ventilation in Controlling SARS-CoV-2 Transmission," Sage, 2020, [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/emg-role-of-ventilation-in-controlling-sars-cov-2-transmission-30-september-2020>
- [4] L. Morawska et al., "How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?," *Environ. Int.*, vol. 142, no. April, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105832.
- [5] A. Cavallini, F. Busato, and F. Pregliasco, "Remarks on the air recirculation in HVAC systems during the SARS-CoV-2 outbreak: the case of all-air ducted plants," *AiCARR J.*, vol. 63, no. 4, pp. 50–55, 2020, doi: 10.36164/AiCARRJ.63.04.03.
- [6] L. Morawska and J. Cao, "Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality," *Environ. Int.*, vol. 139, p. 105730, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105730.
- [7] REHVA, "REHVA Covid19 HVAC Guidance, August 3, 2020", [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0679&from=PT%0Ahttp://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52012PC0011:pt:NOT>
- [8] ASHRAE, "ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols," <https://www.ashrae.org>, 2020.
- [9] REHVA, "Additional guidance for use of fan coils and avoiding recirculation".
- [10] REHVA, "Limiting internal air leakages across the rotary heat exchanger".
- [11] REHVA, "Guidance for Schools".
- [12] CIBSE COVID-19 VENTILATION GUIDANCE, no. May. 2020.
- [13] ECDC, "Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19," no. June, pp. 1–5, 2020, [Online]. Available: <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Ventilation-in-the-context-of-COVID-19.pdf>
- [14] J. Kurnitski, A. Boerstra, and F. Franchimon, "COVID19 HVAC Guidance version 4.1," *Rehva*, p. 41, 2021, [Online]. Available: <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance>
- [15] ASHRAE, "Guidance for the Re-Opening of Schools," p. 55, 2020, [Online]. Available: https://www.ashrae.org/file_library/technical_resources/covid-19/guidance-for-the-re-opening-of-schools.pdf
- [16] B. M. Guo, P. Xu, T. Xiao, R. He, M. Dai, and Y. Zhang, "Review and comparison of HVAC operation guidelines in different countries during the COVID-19 pandemic," *Build. Environ.*, p. 107368, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107368>.
- [17] P. Szałański, W. Cępiński, and J. Misiński, "Review of recommendations for ventilation and air-conditioning systems in relation to the SARS-CoV-2 coronavirus risk and the COVID-19 disease," *INSTAL*, vol. 5, no. 417, pp. 17–21, 2020, doi: 10.36119/15.2020.5.3.

- [18] W. Cępiński, P. Szałański, and J. Misiński, "Reduction of the spread of SARS-CoV-2 coronavirus and COVID-19 disease through ventilation and air conditioning systems," *INSTAL*, vol. 6, no. 418, pp. 28–36, 2020, doi: 10.36119/15.2020.6.3.
- [19] "Opinia NIZP-PZH z dnia 19 marca 2020 r. dotycząca koniecznego zakresu mycia i dezynfekcji instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej w obiektach użyteczności publicznej w związku z rozprzestrzenianiem się," pp. 0–4, 2020.
- [20] P. Szałański and W. Cępiński, "Probability of airborne transmission of SARS-CoV-2 virus in ventilated rooms," *Instal*, vol. 2, no. 437, pp. 23–29, 2022, doi: 10.36119/15.2022.2.5.
- [21] G. Buonanno, L. Morawska, and L. Stabile, "Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications," *Environ. Int.*, vol. 145, no. July, p. 106112, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [22] J. Shen, M. Kong, B. Dong, M. J. Birnkrant, and J. Zhang, "A systematic approach to estimating the effectiveness of multi-scale IAQ strategies for reducing the risk of airborne infection of SARS-CoV-2," *Build. Environ.*, vol. 200, no. February, p. 107926, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107926.
- [23] A. Mikszewski, G. Buonanno, L. Stabile, A. Pacitto, and L. Morawska, *Airborne Infection Risk Calculator*. 2021.
- [24] A. Mikszewski, L. Stabile, G. Buonanno, and L. Morawska, "The airborne contagiousness of respiratory viruses: A comparative analysis and implications for mitigation," *Geosci. Front.*, no. xxxx, p. 101285, 2021, doi: 10.1016/j.gsf.2021.101285.
- [25] L. Morawska et al., "A paradigm shift to combat indoor respiratory infection," *Science* (80-.), vol. 372, no. 6543, pp. 689–691, 2021, doi: 10.1126/science.abcg2025.
- [26] W. Cępiński and P. Szałański, "Air filtration and sterilization in ventilation systems according to the new paradigm," *J. Ecol. Eng.*, vol. 23, no. 10, pp. 25–34, 2022, doi: 10.12911/22998993/152124.
- [27] P. O. Fanger, *Thermal comfort*. New Year: McGraw Hill, 1972.
- [28] T. A. Doremalen N, Bushmaker T, Morris D, Holbrook M, Gamble A, Williamson B and M. V. Harcourt J, Thornburg N, Gerber S, Lloyd-Smith J, de Wit E, "Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1," *N. Engl. J. Med.*, pp. 0–3, 2020, doi: 10.1056/NEJMc2004973.
- [29] A. W. H. Chin et al., "Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions," *The Lancet Microbe*, vol. 1, no. 1, p. e10, 2020, doi: 10.1016/s2666-5247(20)30003-3.
- [30] N. van Doremalen, T. Bushmaker, and V. J. Munster, "Stability of middle east respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) under different environmental conditions," *Eurosurveillance*, vol. 18, no. 38, 2013, doi: 10.2807/1560-7917.ES2013.18.38.20590.
- [31] T. Wang, C. Lien, S. Liu, and P. Selveraj, "Effective Heat Inactivation of SARS-CoV-2," *medRxiv*, p. 2020.04.29.20085498, 2020, doi: 10.1101/2020.04.29.20085498.
- [32] J. L. Domingo, M. Marqués, and J. Rovira, "Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review," *Environ. Res.*, vol. 188, p. 109861, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109861>.
- [33] P. Amoatey, H. Omidvarborna, M. S. Baawain, and A. Al-Mamun, "Impact of building ventilation systems and habitual indoor incense burning on SARS-CoV-2 virus transmissions in Middle Eastern countries," *Sci. Total Environ.*, vol. 733, p. 139356, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139356>.
- [34] D. H. Morris et al., "Mechanistic theory predicts the effects of temperature and humidity on inactivation of sars-cov-2 and other enveloped viruses," *Elife*, vol. 10, 2021, doi: 10.7554/ELIFE.65902.
- [35] E. Kudo et al., "Low ambient humidity impairs barrier function and innate resistance against influenza infection," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 166, no. 22, pp. 10905–10910, 2019, doi: 10.1073/pnas.1902840116.
- [36] "Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 1 grudnia 1998 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowiskach wyposażonych w monitory ekranowe."
- [37] "PN-B-03421:1978 Wentylacja i klimatyzacja – Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi".
- [38] "Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 8 kwietnia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2019 poz. 1065)," 2019.
- [39] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quantitative emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environ. Int.*, vol. 141, p. 105794, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [40] "PN-EN 15242:2009 Wentylacja budynków – Metody obliczeniowe do wyznaczania strumieni objętości powietrza w budynkach z uwzględnieniem infiltracji."
- [41] "CEN Report CR 1752 (1998) Ventilation for buildings – Design criteria for the indoor environment."
- [42] E. Nardell, P. Lederer, H. Mishra, R. Nathavitharana, and G. Theron, "Cool but dangerous: How climate change is increasing the risk of airborne infections," *Indoor Air*, vol. 30, no. 2, pp. 195–197, 2020, doi: 10.1111/ina.12608.
- [43] C. Sun and Z. Zhai, "The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 62, no. June, p. 102390, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102390.
- [44] Minister Pracy i Polityki Socjalnej, "Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy," *Dziennik Ustaw*, no. 129, p. 3976, 1997.