

Strumień objętości powietrza wentylacyjnego wyznaczony na podstawie kryterium zdrowotnego oraz metoda projektowania wentylacji ograniczająca narażenie układu oddechowego na choroby zakaźne przenoszone przez powietrze

21.12.2022

Propozycja REHVA dotycząca docelowych wartości strumienia powietrza wentylacyjnego po epidemii COVID

Wentylacja określona na podstawie kryteriów zdrowotnych i dla uzyskania komfortu użytkowników w budynkach niemieszkalnych

Badania wykazały, że SARS-CoV-2 i inne patogeny układu oddechowego są przenoszone drogą powietrzną. Z tego powodu znaczenie wentylacji w celu zmniejszenia narażenia na COVID-19 i inne choroby zakaźne układu oddechowego przenoszone drogą powietrzną jest powszechnie uznawane. Jednak nadal nie ma metody projektowania wentylacji budynku i innych środków ochrony osób przebywających w budynku przed przenoszeniem chorób układu oddechowego. Obecnie projektowanie wentylacji zgodnie z obowiązującymi normami dotyczącymi środowiska wewnętrznego, tj. EN 16798-1:2019 i ISO 17772-1:2017, polega na stosowaniu kryteriów wentylacji opartych na postrzeganej jakości powietrza (zapachy) w zależności od ich emisji przez ludzi i budynek oraz na kontroli stężenia konkretnych zanieczyszczeń. Takie podejście pomija przenoszenie przez powietrze chorób układu oddechowego, w przypadku których głównym środkiem inżynierskim jest wentylacja, wspomagana w razie potrzeby filtracją i dezynfekcją powietrza¹.

W zaproponowanej w niniejszym dokumencie metodzie projektowania wentylacji, której podstawą jest ocena ryzyka zakażenia, określono docelowe wartości strumienia powietrza wentylacyjnego ograniczające ryzyko przenoszenia chorób zakaźnych. Metoda ta ma na celu uzupełnienie istniejących metod projektowania wentylacji budynków niemieszkalnych, z wyłączeniem budynków ochrony zdrowia i obiektów przemysłowych. Zastosowanie przedstawionych wartości ograniczy rozprzestrzenianie się wirusów atakujących układ oddechowy, takich jak SARS-CoV-2, przeziębienie, grypa i innych chorób, co najmniej do poziomu ryzyka, w którym jedna zakażona osoba nie zakazi więcej niż jedną inną osobę w okresie zakażenia przedobjawowego. W metodzie tej liczbę reprodukcji ustala się na $R=1$ i zakłada się, że prawdopodobieństwo zarażenia innych jest stałe w czasie całkowitej interakcji z osobami podatnymi na zakażenie. Metoda ta jest stosowana w przypadku przenoszenia zakażeń drogą powietrzną na duże odległości; należy więc unikać bliskiego sąsiedztwa, co można osiągnąć zachowując odległość między osobami przebywającymi w pomieszczeniu podczas epidemii wynoszącą co najmniej 1,5 m. Proponuje się, aby docelowe

¹ Morawska, L et al., 'How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?', *Environ. Int.*, vol. 142, p. 105832, 2020.

wartości strumienia powietrza wentylacyjnego były stosowane w projektach nowych budynków i podczas ich modernizacji, tak aby najwyższa wartość strumieni powietrza wyznaczonych wg kryteriów zdrowotnych i komfortu użytkowników była stosowana jako miara projektowej wydajności systemu wentylacyjnego. Strumienie powietrza wentylacyjnego wyznaczone wg kryterium zdrowotnego mogą być wyższe niż wartości wyznaczone dla wentylacji komfortowej i są wymagane tylko w okresach epidemii. W normalnych warunkach – czyli poza okresami epidemii – zaleca się stosowanie wentylacji sterowanej w zależności od potrzeb, aby spełnić wartości wynikające z warunków komfortu i zoptymalizować ilość energii wykorzystywanej do użytkowania wentylacji. Natomiast w przypadku wentylacji budynków sterowanej w zależności od potrzeb, instalacja musi być wyposażona w urządzenia do pomiaru jakości powietrza wewnętrznego oraz sterowania jakością powietrza za pomocą intensywności wentylacji lub innych środków.

Spis treści

| | |
|--|---|
| Wentylacja określona na podstawie kryteriów zdrowotnych i dla uzyskania komfortu użytkowników w budynkach niemieszkalnych | 1 |
| Spis treści | 2 |
| Definicje | 3 |
| 1. Obecnie stosowane zasady projektowania strumieni powietrza wentylacyjnego na podstawie postrzeganej jakości powietrza | 3 |
| 2. Docelowe strumienie objętości powietrza w wentylacji pomieszczeń mieszkalnych określone na podstawie kryteriów zdrowotnych | 4 |
| 3. Eksploatacja systemów wentylacyjnych sterowanych w zależności od potrzeb | 7 |
| 3.1. Sterowanie wentylacją w zależności od aspektów zdrowotnych | 7 |
| 3.2. Sterowanie wentylacją w zależności dla uzyskania komfortu użytkowników | 7 |
| 4. Obliczone strumienie powietrza wentylacyjnego wybranych pomieszczeń | 9 |
| Załącznik 1 | 11 |
| Strumienie powietrza wentylacyjnego obliczone na podstawie ryzyka zakażenia | 11 |
| Przykład obliczania wentylacji biura otwartego | 14 |
| Załącznik 2 | 15 |
| Szczegółowe informacje dotyczące wartości emisji cząstek i strumieni powietrza oddechowego | 15 |
| Załącznik 3 | 19 |
| Przykład pomiaru skuteczności wentylacji pomieszczenia z punktowym źródłem zanieczyszczeń | Błąd! Nie zdefiniowano zakładki. |

Definicje

Docelowy strumień powietrza wentylacyjnego to wymagany strumień objętości powietrza zewnętrznego w strefie oddychania ludzi określony jako najwyższa wartość podana w metodach projektowania wentylacji na podstawie postrzeganej jakości powietrza (równanie 1) i ryzyku infekcji (tabele 1 i 2).

Projektowy strumień powietrza wentylacyjnego to strumień objętości powietrza zewnętrznego dostarczanego przez system wentylacyjny do pomieszczenia z określonym systemem dystrybucji (rozdziálu) powietrza, przyjmowany jako najwyższa wartość z równań (2) i (4).

Skuteczność wentylacji ε_v jest to stosunek strumienia powietrza wentylacyjnego przy pełnym mieszaniu strumienia powietrza do rzeczywistego systemu dystrybucji (rozdziálu) powietrza z rozproszonym źródłem zanieczyszczeń do osiągnięcia zapewniającego takie samo stężenie zanieczyszczeń w strefie oddychania ludzi; w przypadku pełnego mieszania $\varepsilon_v=1$.

Skuteczność wentylacji z punktowym źródłem zanieczyszczeń ε_b należy mierzyć w co najmniej w dwóch pozycjach źródła (infektora). Skuteczność obliczana jest jako średnia z dwóch lub więcej pomiarów stężenia gazu znacznikowego, przy czym w każdym pomiarze uwzględnia się wyniki z 50% punktów pomiarowych o najwyższym stężeniu gazu znacznikowego.

Regulacja jakości powietrza w pomieszczeniach może być osiągnięta przez użytkownika za pomocą systemu wentylacji sterowanej w zależności od potrzeb, który w okresach epidemii jest użytkowany przy zastosowaniu projektowanych strumieni powietrza wentylacyjnego, a poza okresami epidemii - systemu wentylacji, w którym strumienie powietrza wentylacyjnego wynikają z postrzeganej jakości powietrza zgodnie ze wskazaniami CO₂ wspomaganego kontrolą źródła zanieczyszczeń i filtracją powietrza zewnętrznego.

1. Obecnie stosowane zasady projektowania strumieni powietrza wentylacyjnego na podstawie postrzeganej jakości powietrza

W normach EN 16798-1:2019 i ISO 17772-1:2017 jako pierwszą metodę projektową określono jakość powietrza w pomieszczeniach i strumienie powietrza wentylacyjnego na podstawie postrzeganej jakości powietrza (6.3.2.2 Metoda 1). Metoda ta ma zastosowanie do obliczeń wentylacji w przestrzeni wewnętrznej, w której kryteria środowiska wewnętrznego są ustalane na podstawie odczuć użytkowników i w której produkcja lub inne procesy nie mają większego wpływu na środowisko wewnętrzne. Metoda projektowania wentylacji ograniczającej zagrożenia infekcjami układu oddechowego na podstawie kryterium zdrowotnego ma uzupełniać tę metodę, tak aby najwyższy strumień powietrza wentylacyjnego określony wg tych dwóch metod był stosowany w procesie projektowania układu wentylacji.

W budynkach niemieszkalnych projektowe współczynniki wentylacji pomieszczeń użytkowych oblicza się na podstawie jakości powietrza postrzeganej przez osoby odwiedzające (osoby nieprzystosowane) w zależności od emisji zanieczyszczeń przez ludzi i materiały budowlane. Docelowy strumień objętości powietrza zewnętrznego oblicza się w następujący sposób:

$$q_{tot} = Nq_p + A_R q_B \quad (1)$$

gdzie

q_{tot} całkowity strumień powietrza zewnętrznego dostarczanego do strefy oddychania, L/s

N projektowa liczba osób w pomieszczeniu,

q_p strumień objętości powietrza dostarczanego dla każdego użytkownika, L/(s osoba)

A_R pole powierzchni podłogi pomieszczenia, m²

q_B strumień objętości powietrza wynikający z emisyjności zanieczyszczeń przez materiały

budynku, L/(s m²)

W przypadku materiałów o niskiej emisji zanieczyszczeń, strumienie objętości powietrza zewnętrznego w równaniu (1) wynoszą (1 L/s = 3.6 m³/h):

- 10 L/s na osobę + 1 L/s na powierzchnię podłogi w pomieszczeniach kategorii I;
- 7 L/s na osobę + 0,7 L/s na powierzchnię podłogi w pomieszczeniach kategorii II (domyślnej, reprezentującej standardowy poziom oczekiwań);
- 4 L/s na osobę + 0,4 L/s na powierzchnię podłogi w pomieszczeniach kategorii III.

W przypadku stosowania certyfikowanych materiałów budowlanych o bardzo niskiej emisji zanieczyszczeń, wartości L/s na jednostkę powierzchni podłogi są dwukrotnie mniejsze, a w przypadku certyfikowanych materiałów budowlanych o niskiej emisji zanieczyszczeń - są dwukrotnie większe.

W przypadku konkretnych zanieczyszczeń projektowe strumienie objętości powietrza obliczane są na podstawie równania bilansu masy stężenia substancji zanieczyszczeń w przestrzeni, z uwzględnieniem stężenia zanieczyszczeń w powietrzu zewnętrznym (6.3.2.3 Metoda 2 z zastosowaniem kryteriów dotyczących poszczególnych substancji zanieczyszczeń). Metoda ta nie jest omawiana w niniejszym dokumencie, ponieważ jest ona bardzo rzadko stosowana.

Strumienie objętości powietrza zewnętrznego obliczone za pomocą równania (1) dotyczą dystrybucji powietrza zapewniającej całkowite mieszanie powietrza w pomieszczeniu. W przypadku rzeczywistych rozwiązań dystrybucji powietrza, projektowy strumień objętości powietrza dostarczanego przez system wentylacji jest obliczany wg wzoru:

$$q_s = \frac{q_{tot}}{\varepsilon_v} \quad (2)$$

gdzie

q_s projektowy strumień objętości powietrza wentylacyjnego w warunkach rzeczywistego rozdziału powietrza (L/s)

ε_v skuteczność wentylacji określona w normie EN 16798-3:2017; skuteczność usuwania zanieczyszczeń w REHVA GB nr 2 (-)

Skuteczność wentylacji można obliczyć na podstawie zmierzonych wartości stężeń gazów wskaźnikowych:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_o}{C_i - C_o} \quad (3)$$

gdzie

C_e stężenie gazu wskaźnikowego w kanale powietrza wywiewanego

C_i średnie stężenie w pomieszczeniu na poziomie oddychania

C_o stężenie gazu w powietrzu nawiewanym

Strumienie objętości powietrza q_s obliczone wg równania (2) powinny być porównane z docelowymi strumieniami objętości powietrza Q_s obliczonymi na podstawie ryzyka zakażenia, a większa wartość powinna być podstawą wymiarowania systemu wentylacyjnego i wyznaczania projektowego strumienia objętości powietrza.

2. Docelowe strumienie objętości powietrza w wentylacji pomieszczeń mieszkalnych określone na podstawie kryteriów zdrowotnych

Strumienie objętości powietrza wentylacji pomieszczeń obliczone na podstawie ryzyka zakażenia ludzi mogą być obliczone za pomocą wzorów przedstawionych w tabeli 1. Wartości te nie uwzględniają zmniejszonego ryzyka zakażenia spowodowanego szczepieniami i odnoszą się do przypadków, w których ludzie nie noszą maseczek, nie używane są przenośne oczyszczacze powietrza i istnieje rozdział powietrza zapewniający pełne mieszanie oraz spełnione są inne założenia podane w załączniku 1.

Tabela 1. Strumienie objętości powietrza zewnętrznego Q (L/s) obliczane na podstawie liczby osób w pomieszczeniu N (-) i objętości pomieszczenia V (m^3).

| Rodzaj pomieszczenia | Strumień objętości powietrza, L/s |
|----------------------|-----------------------------------|
| Sala lekcyjna | $Q = 10(N-1) - 0.24V$ |
| Biuro | $Q = 23(N-1) - 0.24V$ |
| Aula | $Q = 30(N-1) - 0.24V$ |
| Sala konferencyjna | $Q = 40(N-1) - 0.24V$ |
| Restauracja | $Q = 40(N-1) - 0.24V$ |
| Siłownia | $Q = 70(N-1) - 0.24V$ |

Strumienie objętości powietrza zewnętrznego obliczone wg równań podanych w tabeli 1 dotyczą wentylacji pomieszczeń z układem rozdziału powietrza zapewniającym całkowite mieszanie. Gdy rzeczywiste rozwiązanie rozdziału powietrza tego nie zapewnia, to projektowy strumień objętości powietrza dostarczanego przez system wentylacyjny jest obliczany w następujący sposób:

$$Q_s = \frac{Q}{\varepsilon_b} \quad (4)$$

gdzie

Q_s projektowy strumień objętości powietrza wentylacyjnego przy rzeczywistym rozwiązaniu układu rozdziału powietrza (L/s)

ε_b skuteczność wentylacji z punktowym źródłem zanieczyszczeń określana w strefie oddychania ludzi (-)

Skuteczność wentylacji z punktowym źródłem zanieczyszczeń można obliczyć jako średnią z dwóch lub więcej pomiarów stężeń gazu znacznikowego o różnej lokalizacji źródła, przy czym w każdym pomiarze j uwzględnia się wyniki z 50% punktów pomiarowych o najwyższym stężeniu:

$$\varepsilon_b^j = \frac{c_{je} - c_{jo}}{c_{jb} - c_{jo}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\sum_j \varepsilon_b^j}{m} \quad (6)$$

gdzie

ε_b^j skuteczność wentylacji ze źródłem punktowym wg pomiaru j

| | |
|-----------------|---|
| ε_b | efektywność wentylacji ze źródłem punktowym |
| C_{je} | stężenie j gazu znacznikowego mierzone w kanale wywiewnym |
| C_{jb} | stężenie j mierzone na poziomie strefy oddychania, które jest obliczane jako średnie stężenie z 50% punktów pomiarowych o najwyższych stężeniach (lokalny wskaźnik jakości powietrza w REHVA GB nr 2) |
| C_{j0} | stężenie w powietrzu nawiewanym |
| m | całkowita liczba pomiarów z odpowiadającymi im lokalizacjami źródła punkowego |

Skuteczność wentylacji ε_b może być wyznaczana z wykorzystaniem punkowego źródła zanieczyszczeń (odpowiadającego infektorowi) tak, że co najmniej dwie lokalizacje źródła punkowego są obiektami pomiaru lub symulacji za pomocą metod CFD. Skuteczność wentylacji pomieszczenia z punktowym źródłem zanieczyszczeń różni się od wielkości ε_v podanej w równaniu (2), która jest wyznaczona przy użyciu rozproszonego źródła zanieczyszczenia odpowiadającego normalnemu użytkownikowi pomieszczenia przez wszystkie osoby i stężeniu C_i gazu znacznikowego obliczonemu jako średnia ze wszystkich punktów pomiarowych na poziomie strefy oddychania. W ocenie ryzyka zakażenia krzyżowego, aby uwzględnić potencjalnie wyższe stężenie w pobliżu źródła punkowego, stężenie C_{jb} jest obliczane w każdym pomiarze z połowy punktów pomiarowych o najwyższym stężeniu. Nie należy jednak wykorzystywać wyników w punktach pomiarowych położonych w odległości od źródła mniejszej niż 1,5 m. Ponadto należy wykonać dwa lub więcej pomiarów przy różnej lokalizacji źródła punkowego, a wartość ε_b obliczyć jako średnią z tych pomiarów. Ogólnie, skuteczność wentylacji zależy od układu rozdziału powietrza, lokalizacji źródeł, zysków ciepła itp. a wartości reprezentujące typowe lokalizacje źródeł oraz największe spodziewane odchylenia od wyników z rozproszonego źródła powinny być określone doświadczalnie lub za pomocą symulacji CFD.

W przypadku układu rozdziału powietrza zapewniającego w pełni mieszanie, C_{jb} w strefie oddychania i w powietrzu wywiewanym jest wszędzie taka sama, co daje $\varepsilon_b = \varepsilon_v = 1.0$. Może to mieć zastosowanie w pomieszczeniach o powierzchni do 50 m² z wentylacją mieszającą. W większych pomieszczeniach oraz w pomieszczeniach z przegrodami oczekuje się, że emisja cząstek zakaźnych będzie rozprzestrzeniać się w taki sposób, że powstaną strefy o wyższym i niższym stężeniu zanieczyszczeń. Uwzględnia się to przy stosowaniu wartości C_{jb} które pomijają wyniki z 50% punktów pomiarowych o niższych wartościach stężeń. W dużych pomieszczeniach wartości ε_b mogą być zredukowane do 0,8 lub nawet do 0,5 w pomieszczeniach >200 m². Zaawansowane rozwiązania dystrybucji powietrza, takie jak wentylacja wyporowa, ukierunkowana na osoby przebywające w pomieszczeniu oraz wentylacja osobista, mają możliwy do osiągnięcia potencjał $\varepsilon_b > 1.0$.

Przenośne oczyszczacze powietrza mogą kompensować część strumienia objętości powietrza zewnętrznego określonego na podstawie ryzyka infekcji. Przenośne oczyszczacze powietrza powinny być umieszczone w taki sposób, aby umożliwić równomierne doprowadzenie powietrza do strefy oddychania (mieszanie przez oczyszczacze powietrza może również poprawić skuteczność wentylacji) w pomieszczeniu lub jego strefie o objętości V . W przypadku przenośnego oczyszczacza powietrza stopień usuwania zanieczyszczeń k_f (1/h) jest obliczany na podstawie prędkości przepływu powietrza przez filtr Q_f (m³/h), skuteczności usuwania ePM1 przez filtr η_f (-) i objętości pomieszczenia V (m³) zgodnie ze wzorem:

$$k_f = \frac{Q_f \eta_f}{V} \quad (7)$$

W przypadku przenośnych urządzeń czyszczących z wysokosprawnym filtrem cząstek stałych (HEPA), do obliczenia współczynnika usuwania zanieczyszczeń z filtracji można użyć współczynnika dostarczania czystego powietrza (CADR, m³/h) jako $k_f = CADR/V$. Strumień objętości powietrza zewnętrznego do wentylacji pomieszczeń z przenośnymi oczyszczaczami powietrza można obliczyć za pomocą równań podanych w tabeli 2.

Tabela 2. Strumień powietrza zewnętrznego Q (L/s) do wentylacji pomieszczeń z przenośnymi oczyszczaczami powietrza obliczany jest na podstawie liczby osób w pomieszczeniu N (-) i objętości pomieszczenia V (m^3).

| Rodzaj pomieszczenia | Strumień objętości powietrza, L/s |
|----------------------|-----------------------------------|
| Sala lekcyjna | $Q = 10(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$ |
| Biuro | $Q = 23(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$ |
| Aula | $Q = 30(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$ |
| Sala konferencyjna | $Q = 40(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$ |
| Restauracja | $Q = 40(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$ |
| Siłownia | $Q = 70(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$ |

W przypadku przenośnych oczyszczaczy powietrza o dużej wydajności możliwe jest, że wartość współczynnika wentylacji powietrzem zewnętrznym Q będzie ujemna, co wskazuje, że oczyszczacze powietrza i mechanizmy usuwania, osadzania i rozpadu zanieczyszczeń są wystarczające do usunięcia wirusa. Jednak projektowy strumień powietrza zewnętrznego musi być zawsze równy lub większy niż wartość wynikająca z równania 2.

3. Eksploatacja systemów wentylacyjnych sterowanych w zależności od potrzeb

3.1. Sterowanie wentylacją w zależności od aspektów zdrowotnych

W okresach epidemii, takich jak np. spowodowanych przez gripę sezonową lub COVID-19, zmiana warunków eksploatacji z trybu normalnego na projektowy strumień powietrza wentylacyjnego zewnętrznego (wyższa wartość z równań 2 i 4), musi być dokonana ręcznie, ponieważ czujniki patogenów oddechowych do automatycznego sterowania nie są obecnie dostępne. Projektowy strumień objętości powietrza wentylacyjnego jest wymagany podczas normalnej eksploatacji systemu wentylacyjnego. W systemach wentylacyjnych sterowanych według wskazań czujników CO_2 i temperatury w pomieszczeniu, można to uzyskać zmieniając wartość zadanego stężenia CO_2 na 550 ppm. W warunkach wartości zadanej 550 ppm wentylacja będzie działać w czasie normalnej pracy w sposób ciągły z pełną intensywnością w pomieszczeniach o normalnym zagęszczeniu ludzi i obniżoną intensywnością w pomieszczeniach o mniejszym zagęszczeniu.

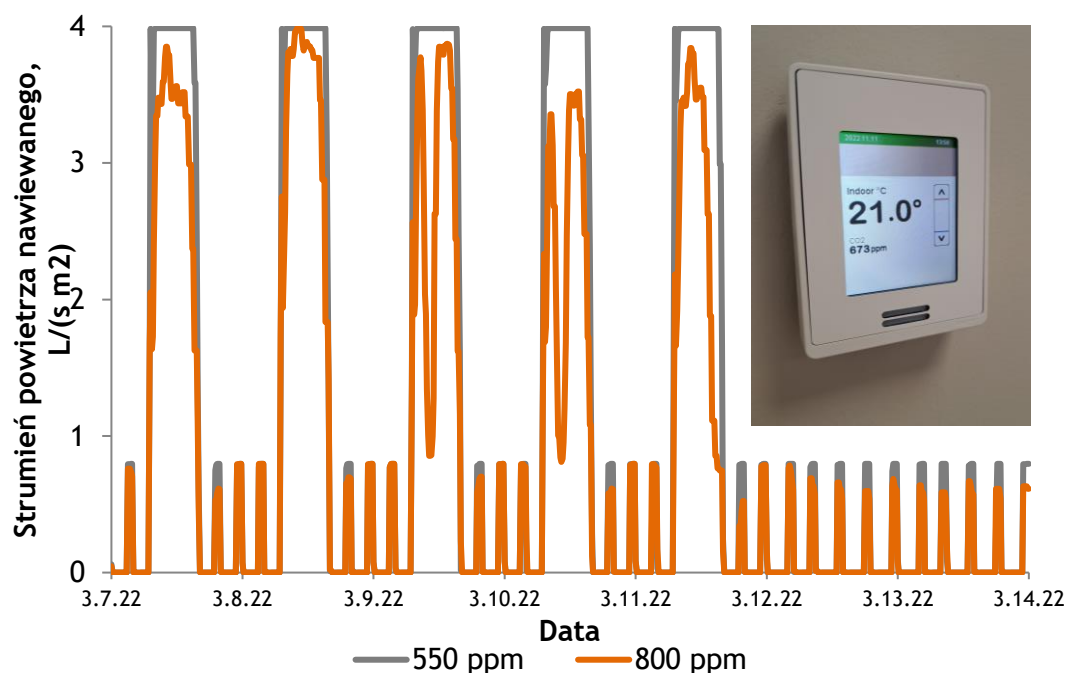
3.2. Sterowanie wentylacją w zależności dla uzyskania komfortu użytkowników

Systemy wentylacyjne poza okresami epidemii powinny być eksploatowane zgodnie z projektowymi strumieniami objętości powietrza określonymi na podstawie postrzeganej jakości powietrza (równanie 2). Zaleca się, aby budynki były wyposażone w urządzenia do pomiaru i do regulacji jakości powietrza w pomieszczeniach (IAQ). Bezpośredni pomiar stężenia zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach jest niewykonalny i na ogół wymaga pobierania próbek powietrza. Z tej przyczyny jako alternatywa, stężenie CO_2 może być stale monitorowane jako zastępczy wskaźnik jakości powietrza w wentylacji i IAQ. Dostępne są również niedrogie czujniki do monitorowania zawartości cząstek stałych $PM_{2,5}$; czujniki te są szczególnie potrzebne w systemach wentylacji naturalnej i hybrydowej, gdzie filtracja powietrza zewnętrznego może zależeć od trybu pracy układu.

Pomiar stężenia CO₂ jako wskaźnik do oceny jakości powietrza wewnętrznego może być stosowany przy spełnieniu następujących warunków wstępnych:

- Należy ograniczyć emisję zanieczyszczeń pochodzących z materiałów budowlanych i wyposażenia wewnątrz stosując materiały budowlane o niskiej emisji zanieczyszczeń określonych w normie EN 16798-1:2019;
- Systemy wentylacyjne muszą być wyposażone w filtry wychwytyjące zanieczyszczenia drobnocząsteczkowe ePM1 lub ePM2,5 określonych w normie EN 16798-3:2017;
- W pomieszczeniach nie powinno być szczególnych źródeł zanieczyszczeń (innych niż emisje z budynków), uniemożliwiających spełnienie wartości podanych w wytycznych WHO i dotyczących zanieczyszczeń powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynków określone w normie EN 16798-1:2019;
- Czujniki CO₂ powinny być ustawione w taki sposób, aby umożliwiły pomiar stężenia CO₂ w pomieszczeniu, a nie stężenia w powietrzu nawiewanym – np. lokalizacja na ścianie musi być tak dobrana, aby strumień powietrza nawiewanego nie docierały do czujnika.

Wskazane cztery warunki wstępne, wraz z prawidłowymi zadanymi wartościami CO₂, zapewniają, że wartości gazowych i pyłowych zanieczyszczenia powietrza będą niższe niż wartości graniczne. Powszechnie dostępne czujniki temperatury i CO₂ oraz regulatory tych wielkości mogą być wykorzystywane do regulacji jakości powietrza wewnętrznego (rys. 1). W systemach wentylacji naturalnej i hybrydowej, w których istnieją tryby pracy bez filtracji powietrza zewnętrznego z filtrami drobnych cząstek, monitorowanie stężenia CO₂ będzie uzupełnione monitorowaniem PM2.5.



Rysunek 1. Przykład regulacji IAQ i temperatury w typowej sali szkolnej w ciągu jednego tygodnia; strumienie objętości powietrza wentylacyjnego odpowiadają nastawom CO₂ 550 ppm i 800 ppm.

Na rysunku 1 można zauważyć, że w okresie epidemii zmiana wartości zadanej CO₂ na 550 ppm zapewnia eksploatację instalacji ze stałą ilością powietrza wentylacyjnego. Poza godzinami pracy wentylacja jest włączana i wyłączana co godzinę i działa przy najniższej możliwej prędkości obrotowej wirnika wentylatora zapewniając średni strumień objętości powietrza 0,15 L/(s m²) zgodnie z normą EN 16798-1:2019.

Zadane wartości stężenia CO₂ można obliczyć na podstawie strumienia objętości powietrza wentylacyjnego wyznaczonego wg ilości powietrza na osobę, obliczanej z całkowitego strumienia objętości powietrza zewnętrznego doprowadzonego do strefy oddychania (równanie 1) i skuteczności wentylacji (równanie 3):

$$q_{PAQ} = \frac{q_{tot}}{\varepsilon_v N} \quad (8)$$

gdzie

q_{PAQ} strumień powietrza określany dla jednej osoby na podstawie postrzegalnej jakości powietrza (L/(s person))

q_{tot} całkowity strumień objętości powietrza zewnętrznego doprowadzonego do strefy oddychania obliczony za pomocą równania (L/s)

ε_v skuteczność wentylacji określona w normie EN 16798-3:2017 (-)

N liczba osób w pomieszczeniu (-)

Zadane wartości stężenia CO₂ można również obliczyć na podstawie metabolicznego wytwarzania CO₂ przez człowieka i bilansu CO₂:

$$C = C_{out} + \frac{q_{CO_2} \frac{1000}{3.6}}{q_{PAQ}} \quad (9)$$

gdzie

C zadana wartość stężenia CO₂ (ppm)

C_{out} stężenie CO₂ w powietrzu zewnętrznym; zwykle 400 ppm

q_{CO_2} strumień objętości powietrza niezbędnego do asymilacji generowanego CO₂: 18 L/(h osoba) w salach lekcyjnych, 20 L/(h osoba) w biurach, salach konferencyjnych i restauracjach oraz 80 L/(h person) w salach gimnastycznych

$\frac{1000}{3.6}$ 3600 i 10⁶ to konwersje jednostek: z godziny na sekundę i z litra na ppm

Zadane wartości stężenia CO₂ obliczone za pomocą równania (9) zależą w znacznym stopniu od liczby osób przebywających w pomieszczeniu (zagęszczenie pomieszczenia). Dlatego w pomieszczeniach o typowym wykorzystaniu, jako zadane wartości CO₂ mogą być stosowane następujące wartości stężenia CO₂:

- 800 ppm w klasach i salach konferencyjnych;
- 650 ppm w biurach, restauracjach i siłowniach.

Te wartości CO₂ spełniają wymagania kategorii I (EN 16798-1:2019), czyli postrzeganej jakości powietrza w większości warunków. Te same wartości mogą być również stosowane w systemach wentylacyjnych zaprojektowanych zgodnie z kategorią II, gdzie stężenia w pomieszczeniach mogą przekraczać wartości zadane w okresach większego zagęszczenia.

4. Obliczone strumienie powietrza wentylacyjnego wybranych pomieszczeń

Zastosowanie równań umożliwiających wyznaczenie strumienia objętości powietrza wentylacyjnego na podstawie ryzyka zakażeń podanych w tabeli 1 zilustrowano przykładami obliczeń wentylacji typowych pomieszczeń; wyniki obliczeń podano w tabeli 3. Strumienie powietrza wentylacyjnego obliczone na podstawie ryzyka infekcji są wyrażone jako L/s na osobę i pole powierzchni podłogi jak również współczynniki wymiany powietrza w wybranych pomieszczeniach. Wartości te są następujące

porównywane ze strumieniami powietrza wentylacyjnego określonymi dla kategorii I i II (EN 16798-1), obliczonymi przy użyciu równania (1) z założeniem zastosowania materiałów budowlanych o niskim stopniu emisji zanieczyszczeń. W obliczeniach strumienia powietrza wentylacyjnego na podstawie ryzyka infekcji wykorzystuje się wartości skuteczności wentylacji pomieszczeń z punktowymi źródłami zanieczyszczeń oszacowane dla typowych rozwiązań wentylacji mieszającej. W przypadku współczynników wentylacji kategorii I i II zakłada się, że rozdział powietrza zapewnia całkowite mieszanie powietrza ($\varepsilon_v=1.0$), ponieważ w tym przypadku zamiast jednego infektora/źródła punktowego wszyscy użytkownicy emitują zanieczyszczenia (ludzkie biofluenty i CO₂). Z tej przyczyny źródło emisji jest również równomiernie rozłożone, a zanieczyszczenia w pełni wymieszane z powietrzem w dużych pomieszczeniach z układami wentylacji mieszającej. Natomiast stężenia CO₂ w powietrzu wewnętrznym są obliczane z wykorzystaniem stężenia CO₂ w powietrzu zewnętrznym 400 ppm i wskaźników generowania CO₂ wynoszących 18 L/h w salach lekcyjnych, 20 L/h w biurach, salach konferencyjnych i restauracjach oraz 80 L/h w salach gimnastycznej.

Tabela 3. Przykład obliczania współczynników skuteczności wentylacji typowych pomieszczeń na podstawie wymagań zdrowotnych i komfortu. Współczynniki skuteczności wentylacji określone na podstawie ryzyka zakażenia oblicza się za pomocą równań przedstawionych w tabeli 1, a wentylację komfortową pomieszczeń kategorii II i I za pomocą równania (2). Stężenie CO₂ oblicza się wg współczynnika wentylacji wyznaczonego na podstawie ryzyka infekcji za pomocą równania 8.

| | Pow. podłogi m ² | Wys. Pom. m | Liczba użytkowników N, - | Wentylacja określona na podstawie ryzyka infekcji | | | | | Wentylacja komfortu | |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|---|--|---|------------------------|---------------------------------|---|--|
| | | | | Efektywność wentylacji ε_b , - | Strumień powietrza went. L/(s pers) | Strumień powietrza went. L/(s m ²) | Krotność wymian 1/h | Stężenie CO ₂ ppm | Kat. II wentylacji L/(s m ²) | Kat. I wentylacji L/(s m ²) |
| | | | | | | | | | | |
| Mała sala lekcyjna | 31,6 | 3,5 | 13 | 1,00 | 7,2 | 3,0 | 3,0 | 1097 | 3,6 | 5,1 |
| Sala lekcyjna | 42,5 | 2,9 | 25 | 0,91 | 9,2 | 5,4 | 6,7 | 941 | 4,8 | 6,9 |
| Sala lekcyjna | 56,5 | 2,9 | 25 | 0,90 | 8,9 | 3,9 | 4,9 | 962 | 3,8 | 5,4 |
| zmniejszone zagęszczenie | 56,5 | 2,9 | 20 | 0,90 | 8,4 | 3,0 | 3,7 | 999 | 3,2 | 4,5 |
| Duża przestrzeń dydaktyczna | 129,5 | 2,9 | 50 | 0,60 | 13,3 | 5,1 | 6,4 | 776 | 3,4 | 4,9 |
| zmniejszone zagęszczenie | 129,5 | 2,9 | 40 | 0,60 | 12,5 | 3,8 | 4,8 | 801 | 2,9 | 4,1 |
| Biuro dwuos. | 21,0 | 2,6 | 2 | 1,00 | 4,9 | 0,5 | 0,6 | 1535 | 1,4 | 2,0 |
| Otwarte biuro | 56,7 | 2,6 | 6 | 0,80 | 16,5 | 1,7 | 2,4 | 736 | 1,4 | 2,1 |
| Otwarte biuro | 173,0 | 2,6 | 17 | 0,60 | 25,4 | 2,5 | 3,5 | 619 | 1,4 | 2,0 |
| Pokój spotkań | 29,2 | 2,6 | 10 | 1,00 | 34,2 | 11,7 | 16,2 | 563 | 3,1 | 4,4 |
| zmniejszone zagęszczenie | 29,2 | 2,6 | 6 | 1,00 | 30,3 | 6,2 | 8,6 | 584 | 2,1 | 3,1 |
| Pokój spotkań | 52,5 | 3,2 | 24 | 0,80 | 45,8 | 20,9 | 23,6 | 521 | 3,9 | 5,6 |
| zmniejszone zagęszczenie | 52,5 | 3,2 | 12 | 0,80 | 41,6 | 9,5 | 10,7 | 534 | 2,3 | 3,3 |
| Restauracja | 259,5 | 2,9 | 154 | 0,60 | 64,3 | 38,1 | 47,3 | 486 | 4,9 | 6,9 |
| zmniejszone zagęszczenie | 259,5 | 2,9 | 50 | 0,60 | 59,3 | 11,4 | 14,2 | 494 | 2,0 | 2,9 |
| Siłownia | 173,5 | 3,5 | 12 | 0,60 | 86,5 | 6,0 | 6,2 | 657 | | |
| Sala gimnastyczna | 217,5 | 6,0 | 25 | 0,50 | 109,1 | 12,5 | 7,5 | 604 | | |

W przypadkach sal lekcyjnych i pomieszczeń biurowych, które zostały podane w tabeli 3, strumień powietrza wentylacyjnego pomieszczeń kategorii I i kategorii II są większe niż strumień powietrza wentylacyjnego określone na podstawie ryzyka zakażenia. W salach konferencyjnych i restauracjach

strumienie objętości powietrza są wysokie nawet przy zmniejszonym zagęszczeniu, co wskazuje, że pomieszczenia te wymagają odpowiednich rozwiązań dystrybucji powietrza o wyższej skuteczności wentylacji, aby spełnić założenia projektu układu wentylacji. Jednak w takich pomieszczeniach wymóg odległości od źródła 1,5 m doprowadzi w przybliżeniu do 50% zagęszczenia (co drugie siedzenie puste); dlatego strumienie powietrza wentylacyjnego podane w tabeli przy normalnym zagęszczeniu nie są istotne.

Załącznik 1

Strumienie powietrza wentylacyjnego obliczone na podstawie ryzyka zakażenia

Wymagany strumień objętości powietrza zewnętrznego w warunkach ustalonej pracy urządzenia przy danym prawdopodobieństwie wystąpienia infekcji oraz układem rozdziału powietrza można obliczyć w następujący sposób²:

$$Q = \frac{(1-\eta_i)IqQ_b(1-\eta_s)D}{\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)} - (\lambda_{dep} + k + k_f + k_{UV})V \quad (10)$$

gdzie

- Q strumień powietrza zewnętrznego (m^3/h)
- p prawdopodobieństwo zakażenia podatnej osoby (-)
- q wskaźnik emisji cząstek przez osobę zakażoną (cząstka/(h pers))
- Q_b objętościowy strumień powietrza oddechowego osoby przebywającej w pomieszczeniu (m^3/h), patrz tabela 1
- I liczba osób zakażonych (-), wartość domyślna $I = 1$
- η_s skuteczność maski na twarz osoby wrażliwej (-)
- η_i skuteczność maski na twarz osoby zakażonej (-)
- D czas użytkowania pomieszczeń (h)
- λ_{dep} osadzanie na powierzchniach (1/h)
- k rozpad wirusa (1/h)
- k_f filtracja przez przenośny oczyszczacz powietrza (1/h)
- k_{UV} dezynfekcja powietrza przez promieniowanie ultrafioletowe UVGI w górnym pomieszczeniu (1/h)
- V objętość pomieszczenia (m^3)

Ogólne równanie (10) uwzględnia również inne, poza nawiewanym powietrzem zewnętrznym potencjalne mechanizmy usuwania wirusów, takie jak oczyszczacze powietrza, UVGI i maski na twarz, które mogą nie występować w wielu sytuacjach. W przypadku jednej osoby zakażonej, braku masek na twarzy i braku oczyszczaczy powietrza i UVGI, równanie (10) upraszcza się do postaci:

$$Q = \frac{qQ_bD}{\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)} - (\lambda_{dep} + k)V \quad (11)$$

² Kurnitski, J, Kiil, M, Wargocki, P, Boerstra, A, Seppänen, O, Olesen, B, and Morawska, L. Respiratory infection risk-based ventilation design method. *Building and Environment*, 206, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108387>

Jeśli używany jest przenośny oczyszczacz powietrza, to stopień usuwania zanieczyszczeń (k_f) obliczany jest na podstawie natężenia przepływu powietrza przez filtr (Q_f), skuteczności usuwania zanieczyszczeń przez filtr (η_f) i objętości pomieszczenia V :

$$k_f = \frac{Q_f \eta_f}{V} \quad (12)$$

W przypadku przenośnych urządzeń oczyszczających powietrza wyposażonych w filtr o wysokiej skuteczności usuwania cząstek stałych (HEPA), współczynnik usuwania zanieczyszczeń może być obliczony na podstawie strumienia objętości doprowadzonego powietrza czystego (CADR, m^3/h), jako $k_f = \text{CADR}/V$. Skuteczność usuwania zanieczyszczeń przez filtry i CADR zależy od wielkości cząstek. Parametry te zostaną oszacowane w zakresie wielkości $0.3\text{-}0.5 \mu\text{m}^3$.

W zależności od skuteczności maski, innych mechanizmów usuwania, wskaźników emisji cząstek i strumienia powietrza oddechowego, zastosowano następujące wartości domyślne:

- skuteczność maski z tkaniny twarzowej⁴ dla osoby podatnej $\eta_s = 0,3$
- skuteczność maski z tkaniny twarzowej dla osoby zakażonej $\eta_i = 0,5$
- frakcja lokalnej populacji, która jest zaszczepiona $f_v = 0$
- współczynnik strat przy powierzchniowym osadzaniu zanieczyszczeń⁵ $\lambda_{dep} = 0,24 \text{ 1/h}$
- częstość rozpadu wirusa⁶ $k = 0,63 \text{ 1/h}$
- wartości średnie w czasie wskaźników emisji cząstek obliczone w załączniku 2, tj. $q = 4$ cząstki/(h os) w salach lekcyjnych, 6 cząstek/(h os) w biurach i salach gimnastycznych oraz 10 cząstek/(h os) w salach konferencyjnych i restauracjach
- liczba osób zakażonych w pomieszczeniu $l = 1$ pers
- uśrednione w czasie wartości strumienia powietrza oddechowego $Q_b = 0,60 \text{ m}^3/\text{h}$ w biurach, $Q_b = 0,57 \text{ m}^3/\text{h}$ w salach lekcyjnych, $Q_b = 0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ w salach konferencyjnych i restauracjach oraz $Q_b = 1,9 \text{ m}^3/\text{h}$ w siłowniach
- czas przebywania ludzi $D = 2, 6, \text{ i } 9$ godzin odpowiednio: w salach konferencyjnych, klasach i biurach
- czas interakcji osoby zakażonej przebywającej w pobliżu osób podatnych na zakażenie, w tym podróże, obiady i inne zajęcia poza domem: $22,5 \text{ h}$ w biurach i 16 h w szkołach ponad $2,5$ dnia przedobjawowego okresu zakaźnego

Dopuszczalne indywidualne prawdopodobieństwo p dla konkretnego pomieszczenia można obliczyć na podstawie liczby reprodukcji R , zdefiniowanej jako liczba nowych przypadków choroby podzielona przez liczbę zakażających $R = N_c/l$. Biorąc pod uwagę, że liczba nowych przypadków $N_c = p N_s$, dopuszczalne indywidualne prawdopodobieństwo p dla konkretnego pomieszczenia można obliczyć w następujący sposób:

$$p = \frac{RI}{N_s} = \frac{RI}{(N-l)(1-f_v \eta_v)} \quad (13)$$

³ Criteria for room air cleaners for particulate matter

https://www.rehva.eu/fileadmin/content/documents/Downloadable_documents/REHVA_COVID-19_Recommendation_Criteria_for_room_air_cleaners_for_particulate_matter.pdf

⁴ Ueki, H et al., 'Effectiveness of face masks in preventing airborne transmission of SARS-CoV-2', *MSphere*, vol. 5, no. 5, 2020.

⁵ Buonanno, G, Morawska, L, and Stabile, L, 'Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications', *Environ. Int.*, vol. 145, p. 106112, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>

⁶ Van Doremalen, N et al., 'Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1', *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, no. 16, pp. 1564–1567, 2020.

gdzie

R numer reprodukcji zdarzenia (-)

N_s liczba osób podatnych w pomieszczeniu, $N_s = N - I$ jeśli nie ma osób zaszczepionych/uodpornionych

f_v frakcja lokalnej populacji, która jest zaszczepiona, $f_v = 0$ - brak szczepień (-)

η_v skuteczność szczepionki w zapobieganiu zakażeniu, $\eta_v = 1$ - idealna ochrona (-)

Dopuszczalna wartość R podczas jednego zdarzenia związanego z zajmowaniem pomieszczenia może być wyznaczona przy założeniu, że prawdopodobieństwo zakażenia innych (tj. liczba zakażeń w jednostce czasu) jest w przybliżeniu stałe w okresie zakaźnym. W takich przypadkach osoba zakażająca nie zarazi w okresie zakaźnym więcej niż jedną osobę:

$$\frac{R}{R_0} \cong \frac{D}{D_{inf}} \implies R \leq \frac{D}{D_{inf}} \text{ jeżeli } R_0 \leq 1 \quad (14)$$

gdzie:

R liczba reprodukcji zdarzeń, tj. liczba osób, które uległy zakażeniu przez jednego zakażonego użytkownika

D okres przebywania w pomieszczeniu, tj. czas, w którym zarówno osoby zakażone, jak i podatne na zakażenie przebywają w tym samym czasie w pomieszczeniu (h)

D_{inf} całkowity czas interakcji, gdy osobnik zakaźny znajduje się w pobliżu każdego podatnego osoby w całym przedobjawowym okresie zakaźnym (h)

R_0 podstawowa liczba reprodukcyjna, która opisuje rozprzestrzenianie się epidemii w populacji (-)

Przedobjawowy okres zakaźny kończy się zwykle wraz z wystąpieniem objawów, gdy osoba zakażona dokonuje samoizolacji w domu lub w inny sposób "ogranicza" kontakt z osobami podatnymi na zakażenie. Okres ten może trwać kilka dni, średnio około 2 dni w przypadku grypy i 2½ dnia w przypadku SARS-CoV-2. Na przykład, jeżeli osoba zakażona przebywa w pobliżu osób podatnych na zakażenie (np. w środkach transportu publicznego, w pracy/szkole) łącznie przez 20 godzin w okresie zakaźnym, to nie może ona zakażyć więcej niż $R = 1/20 = 0.05$ osoby na godzinę, średnio, aby nie przekroczyć granicy $R_0 \leq 1$.

Należy zauważyć, że gdy w pomieszczeniu znajduje się bardzo mała liczba osób podatnych na zakażenie (jak np. w biurze, w którym pracuje tylko kilka osób), to równanie (8) daje wysokie wartości prawdopodobieństwa indywidualnego, które można dodatkowo ograniczyć do pewnej wartości, np. $p \leq 0,1$. Tego obecnie nie zrobiono w tabelach 1 i 2; stąd w biurach, gdzie $R = 9/22,5 = 0.4$, prawdopodobieństwo indywidualne będzie wyższe niż 0,1 gdy liczba osób przebywających w pomieszczeniu wynosi 4 lub mniej.

Możliwe jest uproszczenie równań (5) i (6) za pomocą przybliżenia Taylora wykładnika $e^n \cong 1 + n$ przy małych dawkach, które pozwalają zapisać równanie Wellsa-Rileya $p = 1 - e^{-n}$ w następujący sposób:

$$n \cong \frac{1}{1-p} - 1 \quad (15)$$

gdzie

n cząstki wdychane przez użytkownika (cząstki)

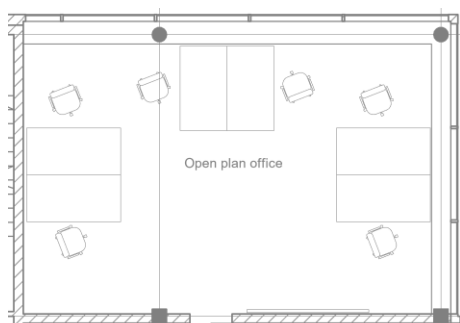
Przybliżenie Taylora zapewni rozsądną dokładność przy niskich wartościach p , na przykład 2,4% przy $p = 0,05$ i 4,7% przy $p = 0,1$. Korzystając z innego przybliżenia $1/(1-p) \cong 1+p$ które ma zastosowanie, jeśli $|p| \ll 1$, równanie (10) można zapisać w następujący sposób:

$$Q = \frac{(1-\eta_i)qQ_b(1-\eta_s)DN_s}{R} - (\lambda_{dep} + k + k_f + k_{UV})V \quad (16)$$

Równanie to umożliwia proste obliczenie strumienia powietrza wentylacyjnego na podstawie ryzyka zakażenia po podstawieniu domyślnych wartości współczynnika emisji cząstek, częstości oddychania i czasu przebywania w pomieszczeniu.

Przykład obliczania wentylacji biura otwartego

Rozważono otwarte pomieszczenie biurowe, o powierzchni 50 m² i wysokości 2,6 m w którym pracuje 6 osób. W pomieszczeniu tym zastosowano wentylację strumieniową o skuteczności $\varepsilon_b=1,2$.



Rysunek 2. Rzut piętra otwartego biura z 6 stanowiskami pracy

W obliczeniach wymaganego strumienia powietrza wentylacyjnego przyjęto następujące dane wejściowe:

- współczynnik powierzchniowego osadzania zanieczyszczeń $\lambda_{dep} = 0,24$ 1/h
- częstość rozpadu wirusa $k = 0,63$ 1/h
- wskaźnik emisji cząstek $q = 6$ cząstek/(h os.)
- liczba osób zakażonych w pokoju $l = 1$ os.
- strumień powietrza oddechowego w biurach i salach lekcyjnych $Q_b = 0,60$ m³/h
- czas trwania obłożenia $D = 9$ godzin
- osoba zakażona przebywa w pobliżu osób podatnych na zakażenie przez 22,5 godziny w ciągu 2,5-dniowego okresu zakażenia

Dopuszczalną liczbę reprodukcji zdarzeń R można obliczyć za pomocą równania (14):

$$R \leq \frac{D}{D_{inf}} = \frac{9}{22.5} = 0.4$$

Dopuszczalne indywidualne prawdopodobieństwo zakażenia p oblicza się za pomocą równania (13):

$$p = \frac{RI}{N_s} = \frac{0.4 \times 1}{6-1} = 0.08$$

Strumień powietrza wentylacyjnego z układem dystrybucji powietrza zapewniającym pełne wymieszanie oblicza się za pomocą równania (11):

$$Q = \frac{qQ_bD}{\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)} - (\lambda_{dep} + k)V = \frac{6 \times 0.60 \times 9}{\ln\left(\frac{1}{1-0.08}\right)} - (0.24 + 0.63)130 = 298.4 \frac{m^3}{h} = 76.5 \frac{L}{s}$$

Ta sama wartość obliczona za pomocą uproszczonego równania wg tabeli 1 jest nieco wyższa, o ok. 5,9%:

$$Q = 22.5(6 - 1) - 0.242 \times 130 = 81.1 \frac{L}{s}$$

Strumień powietrza wentylacyjnego 81,1 L/s odpowiada to 1,6 L/(s m²), co mieści się pomiędzy wartościami strumienia powietrza wentylacyjnego dla pomieszczeń kategorii I i II z materiałami o niskiej emisji zanieczyszczeń, wynoszącymi 2,2 i 1,5 L/(s m²) obliczonymi za pomocą równania (1). Strumień objętości powietrza wentylacyjnego z pełnym wymieszaniem powietrza przelicza się na wentylację strumieniową z wyższą skutecznością działania za pomocą równania (4):

$$Q_s = \frac{Q}{\varepsilon_b} = \frac{81.1}{1.2} = 67,6 \frac{L}{s}$$

Strumień powietrza wentylacyjnego 67,6 L/s odpowiada to 11,3 L/s na osobę lub 1,4 L/(s m²).

Załącznik 2

Szczegółowe informacje dotyczące wartości emisji cząstek i strumieni powietrza oddechowego

Wskaźnik emisji cząstek można wyprowadzić na podstawie emisji objętości wydychanej kropli (ml/h), ładunku wirusowego (RNA/ml) oraz zależności cząstka- odpowiedź (cząstki/RNA) i wyrazić za pomocą następującego równania:

$$q = c_v \cdot c_i \cdot V_{exh} \quad (17)$$

gdzie

- q wskaźnik emisji cząstek na osobę zakażoną (cząstka/(h·osoba))
- c_v ładunek wirusów w drogach oddechowych (RNA/mL)
- c_i zależność cząstka-odpowiedź zdefiniowana jako stosunek jednej zakaźnej do dawki zakaźnej wyrażonej w kopiach wirusowych, tj. liczby kopii wirusowego RNA potrzebnych do zakażenia co najmniej 63,21% osób podatnych (cząstka/RNA)
- V_{exh} całkowita objętość kropli oddechowych wydychanych w jednostce czasu (mL/h)

Wskaźnik emisji objętościowej kropli można obliczyć za pomocą następującego modelu⁷:

$$V_{exh} = 3600 \cdot 10^6 \cdot \sum_{i=1}^6 P_{i,br,sp,si} \cdot V_i(D) \quad (18)$$

⁷ Aganovic A, Bi Y, Cao G, Drangsholt F, Kurnitski J, and Wargocki P. Estimating the impact of indoor relative humidity on SARS-CoV-2 airborne transmission risk using a new modification of the Wells-Riley model. *Build Environ.* 2021 Nov;205:108278. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108278

gdzie

P_i wskaźnik emisji cząstek w i-tym bloku sześciu średnic kropli aerozolu podczas czynności wydechowych, zmierzony przez Fleischera⁸ i przedstawiony w tabeli 4 (cząstki/s)

$V_i(D)$ całkowita objętość z każdego przedziału wielkości (mL)

Tabela 4. Całkowita sucha objętość aerozoli w litrze wydychanego powietrza podczas różnych czynności oddechowych (br - oddychanie, sp - mówienie, si - śpiewanie)

| Przedział wielkości (μm) | $P_{i,br}$ | $P_{i,sp}$ | $P_{i,si}$ |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| 0,30–0,50 | 550 | 1800 | 10100 |
| 0,50–1,00 | 220 | 700 | 6000 |
| 1,00–3,00 | 80 | 200 | 2300 |
| 3,00–5,00 | 2 | 0 | 4 |
| 5,00–10,00 | 0 | 2 | 3 |
| 10,00–25,00 | 0 | 0 | 2 |

Wirusowe RNA w różnej wielkości aerozolach oddechowych emitowanych przez zakażonych pacjentów zostało zmierzone przez Colemana⁹, dając podstawę do obliczenia kopii wirusowych $c_{v,(D_{dry} \leq 5 \mu\text{m})}$ zawartych w drobnych odwodnionych aerozolach na podstawie równania równowagi kopii RNA:

$$c_{v,breath,eq(\leq 5 \mu\text{m})} = 8.7 \cdot c_{v,0} \quad (19)$$

$$c_{v,speak,eq(\leq 5 \mu\text{m})} = 78.7 \cdot c_{v,0} \quad (20)$$

$$c_{v,sing,dry(\leq 5 \mu\text{m})} = 26.0 \cdot c_{v,0} \quad (21)$$

W celu określenia wiremii $c_{v,0}$ w płwocinie można zastosować średnią wartość $10^8 \frac{\text{RNA}}{\text{mL}}$, która jest zbliżona do mediany wiremii u osób niezaszczepionych (mediana $10^{8.1} \frac{\text{RNA}}{\text{mL}}$) i zaszczepionych (mediana $10^{7.8} \frac{\text{RNA}}{\text{mL}}$)¹⁰.

Relacja cząstka-RNA $1 \text{ quanta} = 14 \cdot 10^4$ kopii RNA została określona przez Sendera¹¹, który przeanalizował dane dotyczące ludzkiego oddychania zgłoszone dla dzikiego wariantu pre-alfa. Na podstawie relacji cząstka-RNA dla oryginalnego szczepu Wuhan można określić¹³ cząstkę-RNA dla kilku kolejnych szczepów jak to pokazano w tabeli 5.

⁸ Fleischer M, Schumann L, Hartmann A, et al. Pre-adolescent children exhibit lower aerosol particle volume emissions than adults for breathing, speaking, singing and shouting. *J R Soc Interface*. 2022;19(187):20210833. doi:10.1098/rsif.2021.0833

⁹ Coleman, K et al. 'Viral Load of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in Respiratory Aerosols Emitted by Patients With Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) While Breathing, Talking, and Singing'. *Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America* vol. 74,10 (2022): 1722-1728. doi:10.1093/cid/ciab691

¹⁰ Costa, R, Olea, B, Bracho, MA, et al. RNA viral loads of SARS-CoV-2 Alpha and Delta variants in nasopharyngeal specimens at diagnosis stratified by age, clinical presentation and vaccination status. *J Infect*. 2022;84(4):579-613. doi:10.1016/j.jinf.2021.12.018

¹¹ Sender, R et al. 'The total number and mass of SARS-CoV-2 virions'. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* vol. 118,25 (2021): e2024815118. doi:10.1073/pnas.2024815118

Tabela 5. Szacowana zależność cząstka-RNA dla różnych szczepów SARS-CoV-2

| Szczep SARS-CoV-2 | Zakaźność w porównaniu z wariantem w poprzednim rzędzie | c_i ($\frac{\text{cząstka}}{\text{RNA}}$) | Wariant wirusa mnożący cząstki (-) |
|---------------------|---|---|------------------------------------|
| Originalny (Wuhan) | - | 14000 | 1.0 |
| Alpha (B.1.1.7) | +90 % | 7400 | 1.9 |
| Delta (B 1.617.2) | +150 % | 5000 | 2.8 |
| Omicron (B.1.1.529) | +420 % | 1200 | 11.7 |

Porównując wskaźniki emisji cząstek (cząstka/h) ze wskaźnikami określonymi w modelu zaproponowanym przez Buonanno¹², można stwierdzić, że występują różnice ponad dziesięciokrotnie nawet przy tych samych aktywnościach wydechowych i ładunku wirusowym¹³, co pokazano w tabeli 6. Ta znacząca różnica spowodowana jest różnicą między wartościami użytymi do opisu relacji cząstka-RNA c_i . Buonanno użył $c_i = 2 \cdot 10^{-2} (\frac{\text{quanta}}{\text{RNA}})$, na podstawie danych dla SARS-CoV-1, co oznacza, że należałoby połączyć co najmniej 200 kopii wirusa, aby zainfekować co najmniej 63,2% podatnej populacji, w porównaniu do 14 000 kopii wirusowych oryginalnego szczepu SARS-CoV-2.

Tabela 6. Średnie wskaźniki emisji cząstek (cząstka/h) szczepu pierwotnego SARS-CoV-2

| Aktywność | Buonanno et al. ¹ | | |
|------------|--|--|--|
| | Obciążenie wirusowe 10 ⁷ RNA/mL | Obciążenie wirusowe 10 ⁷ RNA/mL | Obciążenie wirusowe 10 ⁸ RNA/mL |
| Oddychanie | 0,72 | 0,01 | 0,13 |
| Mówienie | 9,7 | 0,38 | 3,8 |
| Śpiewanie | 62 | 0,90 | 9,0 |

¹ W przypadku Buonanno odnosimy się do 66 wartości percentyla. W tym dokumencie, w przypadku wirerii wynoszącej 107 RNA/mL i 108 RNA/mL odnosimy się odpowiednio do 35 i 56 wartości percentyla.

Wartości współczynnika emisji cząstek przy obciążeniu wirusowym 10⁸ RNA/ml dla wariantów wirusa Delta i Omicron, podane w tabeli 7 obliczono stosując mnożniki wariantów wirusa z tabeli 5. Są one porównywalne z wartościami dla wirusów przeziębienia w zakresie $q = 1 \dots 10$ cząstek/h¹⁴. Znacznie niższe wartości, takie jak $q = 0,2$ cząstek/h, zostały wyznaczone dla wirusa grypy¹⁵.

¹² Buonanno, G, Morawska, L, and Stabile, L, 'Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications', *Environ. Int.*, vol. 145, p. 106112, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>

¹³ Aganovic, A, Cao, G, Kurnitski, J, and Wargocki, P, 'New dose-response model and SARS-CoV-2 quanta emission rates for calculating the long-range airborne infection risk', *Building and Environment* (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109924>

¹⁴ Sun, Y, Wang, Z, Zhang, Y, and Sundell, J, 'In China, students in crowded dormitories with a low ventilation rate have more common colds: evidence for airborne transmission', *PLoS One*, vol. 6, no. 11, p. e27140, 2011.

¹⁵ Bueno de Mesquita, PJ, Noakes, CJ, and Milton, DK, 'Quantitative aerobiologic analysis of an influenza human challenge-transmission trial', *Indoor Air*, vol. 30, no. 6, pp. 1189–1198, 2020.

Tabela 7. Charakterystyczne wartości chorób wirusowych. Wszystkie wartości w tej tabeli są przybliżone, z dużym poziomem niepewności. Wartości wskaźników emisji cząstek są 56 percentylem, z wyjątkiem "super-rozsiewacz", który jest 95-procentowym percentylem dla człowieka stojącego i mówiącego. Termin "10% mówienia" oznacza, że zakażone osoby mówią średnio przez 10% czasu.

| Szczep wirusa | | SARS-CoV-2 oryginalny | Wariant Delta † | Wariant Omicron † | Grypa sezonowa (grypa) | Rhinovirus (zwykłe przeziębienie) | Odra |
|--|--|-----------------------|-----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------|
| Okres infekcji, D_i ¹ [dni] | | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2 | 3 | 4 |
| Skuteczność szczepionki, η_v ² | | 0,94 | 0,94 | 0,85 | 0,4 | - | 0,97 |
| Szybkość inaktywacji (rozpadu) wirusa, λ_d [1/h] | | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,80 | est, 0,63 | est, 0,63 |
| Wskaźnik emisji cząstek, q_e [cząstka/h] ³ | Szpital, odpoczywający pacjent | 0,13 | 0,36 | 1,5 | 0,035 | 0,21 | 3,1 |
| | Sala lekcyjna, 5% mówienia | 0,31 | 0,9 | 3,7 | 0,19 | 2 | 18 |
| | Praca biurowa, 10% mówienia | 0,50 | 1,4 | 5,8 | 0,24 | 2 | |
| | Restauracja, 20% mówienia | 0,86 | 2,4 | 10,1 | 0,29 | 2 | |
| | Spotkanie, 20% mówienia | 0,86 | 2,4 | 10,1 | 0,34 | 2 | |
| | Sport, 50% ciężkie ćwiczenia, 50% odpoczynek | 0,51 | 1,4 | 5,9 | - | - | |
| | Śpiewanie | 9,0 | 25 | 105 | - | - | - |
| | Super-rozsiewacz | 90 | 250 | 1050 | 4,10 | 23 | 6400 |

¹ Czas do momentu samoizolacji osoby z powodu wystąpienia ciężkich objawów

² Skuteczność szczepionki przeciwko zakażeniu. Dla wszystkich wariantów SARS-CoV-2 skuteczność szczepionki wynosi dla co najmniej 3 dawek szczepionki typu mRNA. W przypadku grypy wymaga to sezonowej dawki przypominającej. W przypadku odry - co najmniej 2 dawki

³ Wszystkie wskaźniki emisji cząstek są szacowane na podstawie wartości mediany

Objętościowe strumienie powietrza oddechowego zależą od aktywności człowieka¹⁶ jak pokazano w tabeli 8. W tabeli 9 podano strumienie powietrza oddechowego ludzi przebywających w różnych pomieszczeniach; obliczono na podstawie wartości z tabeli 8.

Tabela 8. Strumienie powietrza oddechowego

| Aktywność | Strumień powietrza oddechowego Q_b , m ³ /h |
|--|--|
| Domyślna aktywność w pozycji siedzącej, bez mówienia | 0.54 |
| Mówienie | 1.10 |
| Lekkie ćwiczenia | 1.38 |
| Ciężkie ćwiczenia | 3.30 |

¹⁶ Binazzi, B et al., 'Breathing pattern and kinematics in normal subjects during speech, singing and loud whispering', *Acta Physiol.*, vol. 186, no. 3, pp. 233–246, 2006.

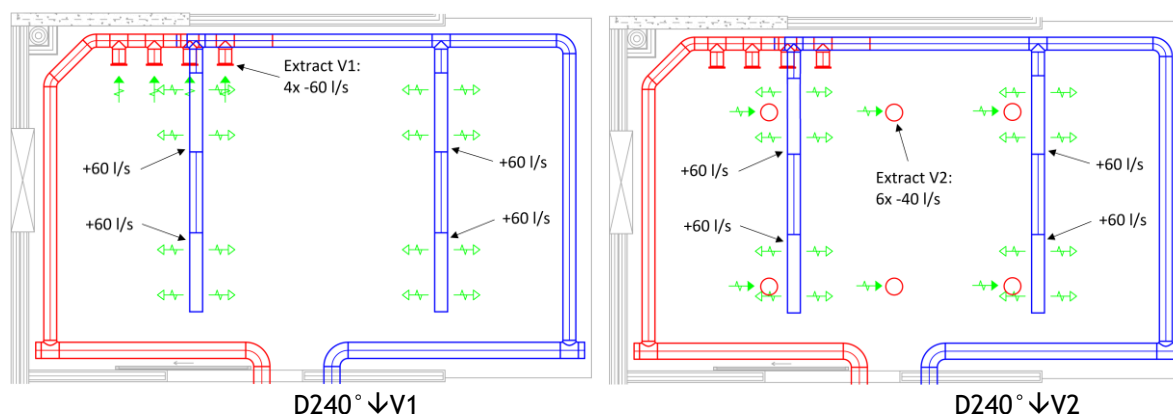
Tabela 9. Uśrednione w czasie strumienie powietrza oddechowego ludzi w różnych pomieszczeniach

| Pomieszczenie | Strumień powietrza oddechowego Q_b , m ³ /h |
|--|--|
| Sala lekcyjna, liczba zakażonych uczniów, 5% | 0,57 |
| Praca biurowa, 10% mówienie | 0,60 |
| Spotkanie, 20% mówienia | 0,65 |
| Restauracja, 20% mówienia | 0,65 |
| Zakupy, 10% mówienia | 1,35 |
| Sport, 50% ciężkie ćwiczenia, 50% odpoczynek | 1,92 |

Załącznik 3

Przykład pomiaru skuteczności wentylacji pomieszczenia z punktowym źródłem zanieczyszczeń

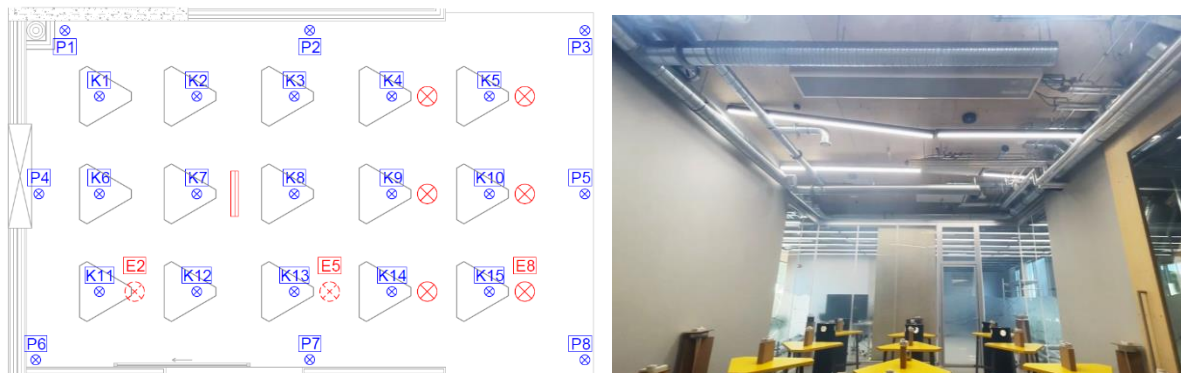
Dwa systemy dystrybucji powietrza z nawiewnikami kanałowymi, pokazane na rysunku 3, zostały zbadane, zgodnie z procedurą pomiaru lokalnego wskaźnika jakości powietrza określoną w REHVA GB nr 2. Jest to wentylacja w sali lekcyjnej z otwartym sufitem, o wysokości 3,8 m i powierzchni 5,2 × 8,7 m (45 m²). W obu przypadkach zastosowano dwa nawiewniki kanałowe z dyszami dolnymi i bocznymi (240°), z tym, że w przypadku D240° ↓V1, urządzenia wywiewne zainstalowano w jednym rogu sufitu sali lekcyjnej, a system D240° ↓V2 miał sześć równomiernie rozmieszczonych wyciągów na suficie. We wszystkich pomiarach strumień powietrza wentylacyjnego wynosił 240 L/s (5,3 L/(s m²), 5 l/h), temperatura powietrza nawiewanego 18°C, a temperatura w pomieszczeniu 22°C.



Rysunek 3. Porównanie dwóch systemów dystrybucji powietrza z nawiewnikami kanałowymi. D240° ↓V1 ma cztery urządzenia wywiewne w jednym rogu sufitu sali lekcyjnej a D240° ↓V2 ma sześć wyciągów sufitowych.

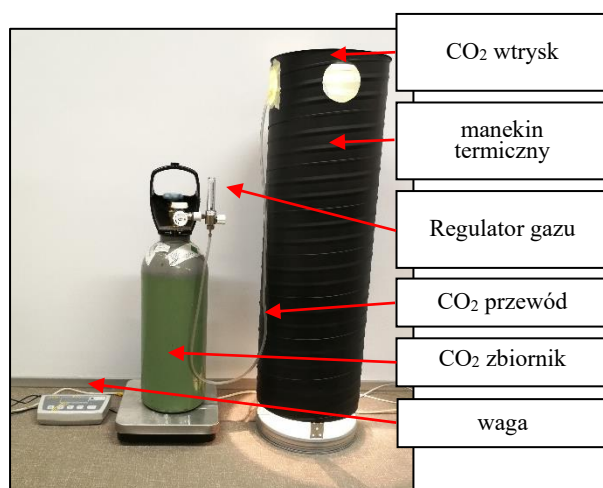
W obu systemach dystrybucji powietrza pomiary wykonano przy trzech lokalizacjach punkowego źródła zanieczyszczeń E2, E5 i E8, jak pokazano na rys. 4. Źródła punktowe zlokalizowano nie w środku pomieszczenia, lecz na rzędach biurków, co oznacza, że istniała większa odległość, z której można było pobrać powietrze. Jako gaz znacznikowy zastosowano CO₂ z metodą ciągłego dawkowania. Stężenia CO₂ mierzono za pomocą 15 kalibrowanych dataloggerów K1-K15 na biurkach

(płaszczyzna oddychania, $h=1.1$ m). Jeden rejestrator znajdował się w kanale nawiewnym w celu pomiaru stężenia referencyjnego powietrza zewnętrznego, a drugi w kanale wywiewnym dla $D240^\circ \downarrow V1$ z jedną lokalizacją wywiewu. W $D240^\circ \downarrow V2$, w każdym punkcie wywiewu zainstalowano sześć rejestratorów i obliczono średnie ważone stężenia CO_2 w powietrzu wywiewanym, przy czym wagą była prędkość przepływu powietrza. W celach obrazowych, aby uzyskać kolorowe wykresy stężenia CO_2 zastosowano dodatkowo 8 rejestratorów P1-P8 na obwodzie na tej samej wysokości $h=1.1$ m.



Rysunek 4. Lokalizacja punktów pomiarowych oraz zdjęcie pomieszczenia makiety. Punkty pomiarowe płaszczyzny oddychania K1-K15 na wysokości 1.1 m stanowiska źródeł zanieczyszczeń E2, E5 i E8 oraz punkty pomiarowe obwodu P1-P8, które zo-stały wykorzystane wyłącznie w celach poglądowych.

Podczas badania gaz znaczkowy był dawkowany w sposób ciągły z butli CO_2 podłączonej do manekina jako źródła zanieczyszczeń (rys. 5). Wewnątrz manekina przewód z gazem znaczkowym skierowano w dół, aby uzyskać dobre wymieszanie z powietrzem, przy czym zapewniono, że z dolnego otworu manekina nie będzie uwalniany gaz znaczkowy. Z tej przyczyny z manekina uwalniany był do pomieszczenia zmieszany gaz znaczkowy z górnych otworów. W celach poglądowych zmierzono również efektywność wymiany powietrza, co wykonano metodą pomiaru rozkładu stężenia. W tym przypadku gaz znaczkowy został wpuszczony do pomieszczenia i dobrze wymieszany za pomocą wentylatora przed przeprowadzeniem pomiaru zaniku stężenia.



Rysunek 5. Butla CO_2 podłączona do manekina wykorzystywanego jako źródło zanieczyszczeń.

Lokalny wskaźnik jakości powietrza obliczono w każdym punkcie pomiarowym K1-15 wg zależności:

$$\varepsilon_P = \frac{C_e - C_o}{C_P - C_o} \quad (22)$$

gdzie

ε_P lokalny wskaźnik jakości powietrza w punkcie pomiarowym P

C_P stężenie w stanie ustalonym w punkcie pomiarowym P

Lokalny wskaźnik jakości powietrza (równanie (22)) jest podobny do występującego w równaniu (5), z tą różnicą, że wykorzystywane jest stężenie CO_2 w konkretnym punkcie pomiarowym. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 10, gdzie w celach poglądowych obliczono średnią ze wszystkich punktów pomiarowych (skuteczność wentylacji wg równania (3)).

Tabela 10. Lokalny wskaźnik jakości powietrza obliczony za pomocą równania (22) w dwóch badanych systemach dystrybucji powietrza z trzema lokalizacjami punkowego źródła zanieczyszczeń ($2 \times 3 = 6$ pomiarów). Punkty pomiarowe znajdujące się bliżej niż 1,5 m od źródła zostały wyróżnione i wyłączone z obliczeń, których wyniki podano w tabeli 11.

| | D240°↓V1 | | | D240°↓V2 | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Źródło E2 | Źródło E5 | Źródło E8 | Źródło E2 | Źródło E5 | Źródło E8 |
| K1 | 1,05 | 0,96 | 1,01 | 1,09 | 0,90 | 1,51 |
| K2 | 1,10 | 0,98 | 1,03 | 1,06 | 0,95 | 1,29 |
| K3 | 1,01 | 0,89 | 0,96 | 1,10 | 1,07 | 1,13 |
| K4 | 0,94 | 0,82 | 0,85 | 1,10 | 1,27 | 1,03 |
| K5 | 0,99 | 0,93 | 0,87 | 1,23 | 1,30 | 0,76 |
| K6 | 1,04 | 1,02 | 1,10 | 1,11 | 0,88 | 1,58 |
| K7 | 1,10 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 0,92 | 1,40 |
| K8 | 1,23 | 1,06 | 0,94 | 1,14 | 1,16 | 1,13 |
| K9 | 1,12 | 1,01 | 0,89 | 1,24 | 1,16 | 1,02 |
| K10 | 1,21 | 1,10 | 0,98 | 1,29 | 1,22 | 0,78 |
| K11 | 1,04 | 1,04 | 1,07 | 1,02 | 1,08 | 1,46 |
| K12 | 1,04 | 0,76 | 0,78 | 0,88 | 1,25 | 1,25 |
| K13 | 1,10 | 0,80 | 0,76 | 1,00 | 2,03 | 1,20 |
| K14 | 1,18 | 0,77 | 0,65 | 1,15 | 2,31 | 1,02 |
| K15 | 1,11 | 1,04 | 0,57 | 1,14 | 1,63 | 0,75 |
| AVG K1-K15 | 1,09 | 0,95 | 0,90 | 1,10 | 1,28 | 1,15 |

Obliczenia skuteczności wentylacji pomieszczenia z punktowym źródłem zanieczyszczeń przedstawiono w tabeli 11. Punkty pomiarowe znajdujące się bliżej źródła niż 1,5 m (wyróżnione w tabeli 4) są wyłączone, a wszystkie pozostałe wartości są sortowane w kolejności rosnącej. Z 50% wyników pomiarów w punktach o najniższych wartościach (wyróżnionych w tabeli 11) obliczana jest średnia. Ostatecznie, skuteczność wentylacji ε_b jest obliczana jako średnia wyników pomiarów w trzech lokalizacjach źródła zanieczyszczeń.

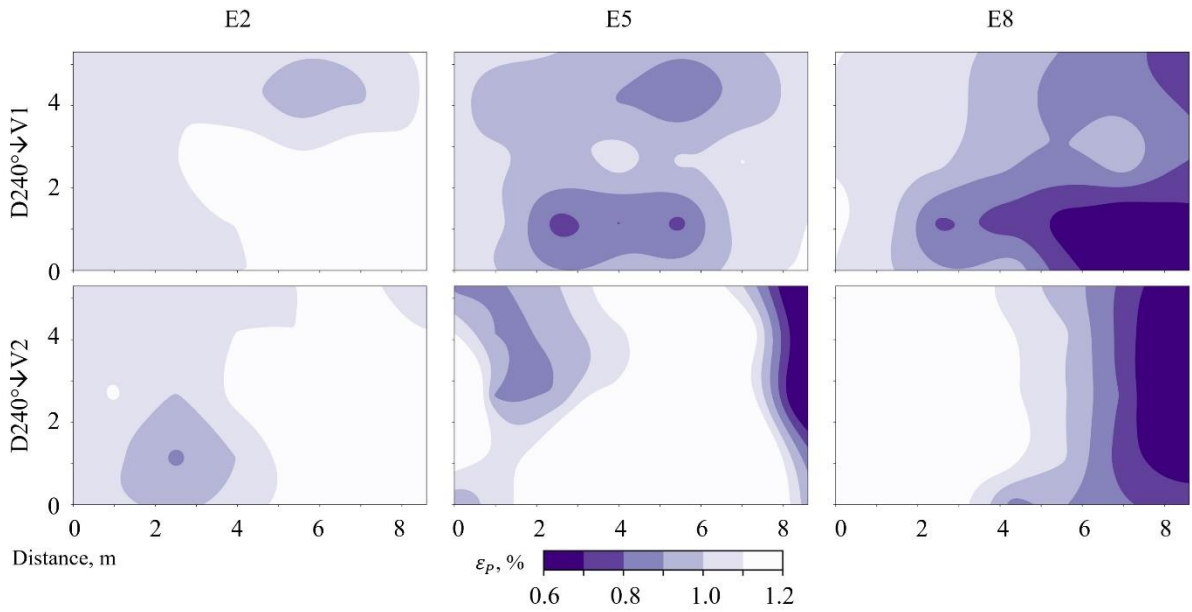
Tabela 11. Obliczenia skuteczności wentylacji punktowej ε_b .

| | D240°↓V1 | | | D240°↓V2 | | |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| | Źródło E2 | Źródło E5 | Źródło E8 | Źródło E2 | Źródło E5 | Źródło E8 |
| | 0,94 | 0,76 | 0,65 | 0,88 | 0,88 | 0,76 |
| | 0,99 | 0,77 | 0,76 | 1,00 | 0,90 | 0,78 |
| | 1,01 | 0,82 | 0,78 | 1,00 | 0,92 | 1,02 |
| | 1,04 | 0,89 | 0,85 | 1,06 | 0,95 | 1,02 |
| | 1,04 | 0,93 | 0,87 | 1,09 | 1,07 | 1,03 |
| | 1,05 | 0,96 | 0,89 | 1,10 | 1,08 | 1,13 |
| | 1,10 | 0,98 | 0,94 | 1,10 | 1,16 | 1,13 |
| | 1,10 | 1,00 | 0,96 | 1,11 | 1,16 | 1,20 |
| | 1,10 | 1,01 | 0,98 | 1,14 | 1,22 | 1,25 |
| | 1,11 | 1,02 | 1,01 | 1,14 | 1,25 | 1,29 |
| | 1,12 | 1,04 | 1,03 | 1,15 | 1,27 | 1,40 |
| | 1,18 | 1,04 | 1,03 | 1,23 | 1,30 | 1,46 |
| | 1,21 | 1,06 | 1,07 | 1,24 | 1,63 | 1,51 |
| | 1,23 | 1,10 | 1,10 | 1,29 | 2,31 | 1,58 |
| Średnia z 50% punktów pomiarowych o najniższych wartościach | 1,02 | 0,87 | 0,82 | 1,03 | 1,00 | 0,98 |
| Średnia z 2 lokalizacji źródeł (E5 i E8) | | | 0,85 | | | 0,99 |
| Średnia z 3 lokalizacji źródeł | | | 0,91 | | | 1,00 |

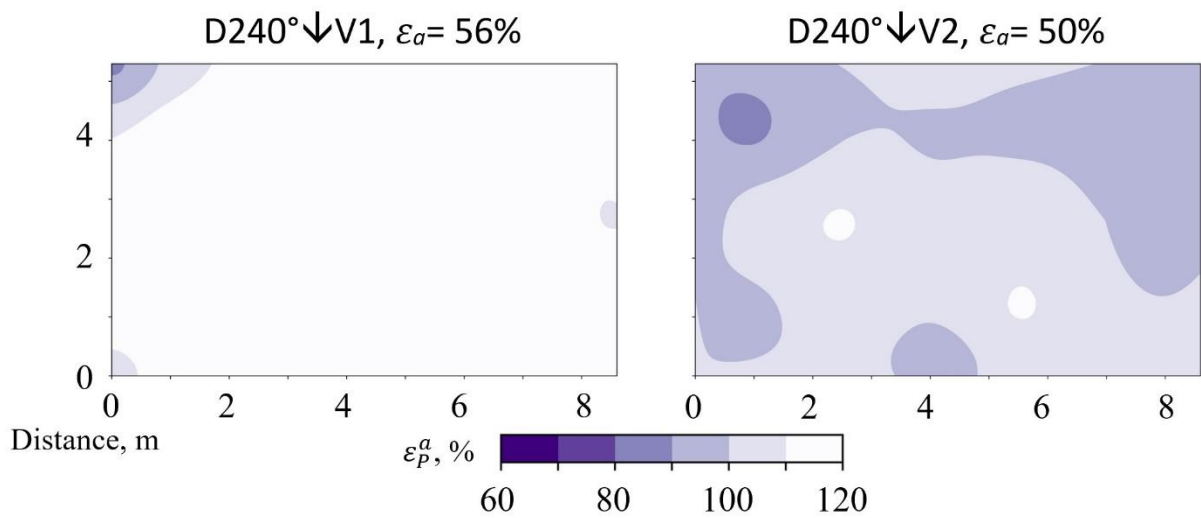
Z tej przyczyny do obliczenia projektowego strumienia powietrza wentylacyjnego przy użyciu równania 4 należy przyjąć wartość skuteczności wentylacji punktowej $\varepsilon_b = 0,91$ z systemem dystrybucji powietrza D240°↓V1 i $\varepsilon_b = 1,00$ z systemem dystrybucji powietrza D240°↓V2.

Gdyby pomiar wykonano tylko w dwóch lokalizacjach źródeł E5 i E8 (na środku pomieszczenia i na jednym z jego końców, co zapewniło większą odległość ekstrakcji), wartości ε_b byłyby nieco niższe ze względu na istnienie większej liczby niekorzystnych lokalizacji źródeł odpowiednio: 0,85 vs 0,91 dla D240°↓V1 i 0,99 vs. 1,00 dla D240°↓V2.

W celu ilustracji rozkładu stężeń zanieczyszczeń w pomieszczeniu wykreślono wartości lokalnego indeksu jakości powietrza, co pokazano na rys. 6. Można je porównać z wartościami skuteczności wymiany powietrza ε_a , które zostały wyznaczone za pomocą metody rozkładu stężeń i źródła rozproszonego (rys. 7). Można zauważyć, że w D240°↓V1 uzyskano wyższą sprawność wymiany powietrza (56%) niż w D240°↓V2 (50%), co dokładnie odpowiada w pełni mieszającej się dystrybucji powietrza. Należy zauważyć, że w pełni mieszająca dystrybucja powietrza ze źródłem rozproszonym nie musi być w pełni mieszająca w przypadku źródła punktowego, jak to ma miejsce w przypadku D240°↓V1. Pomimo osiągnięcia 56% sprawności wymiany powietrza, ten system dystrybucji powietrza zapewnia niższą wartość skuteczności wentylacji ze źródłem punktowym (0,91). Jednocześnie w przypadku D240°↓V2 z wieloma punktami wywiewu uzyskano pełne wymieszanie zarówno w przypadku źródła rozproszonego, jak i punktowego ($\varepsilon_a = 50\%$ and $\varepsilon_b = 1,00$).



Rysunek 6. Rozkład wartości lokalnego indeksu jakości powietrza przy trzech lokalizacjach punktowego źródła zanieczyszczeń.



Rysunek 7. Wartości efektywności wymiany powietrza oraz rozkład wartości wskaźnika lokalnej wymiany powietrza.

Kolofon (nota informacyjna)

Dokument ten został przygotowany przez Nordic Ventilation Group i był recenzowany przez grupę zadaniową COVID-19 Komitetu Technologii i Badań REHVA.

Członkowie Nordic Ventilation Group:

Alireza Afshari Professor, Aalborg University
Amar Aganovic Associate Professor, UiT The Arctic University of Norway
Gyangyu Cao Professor, NTNU - Norwegian University of Science and Technology
Lars Ekberg Associate Professor, Chalmers University of Technology
Per Kvols Heiselberg Professor, Aalborg University
Dennis Johansson Associate Professor HVAC, Lund University
Risto Kosonen Professor, Aalto University
Jarek Kurnitski Professor, TalTech - Tallinn University of Technology
Ivo Martinac Professor, KTH Royal Institute of Technology
Hans Martin Mathisen Professor, NTNU - Norwegian University of Science and Technology
Arsen Melikov Professor, DTU - Technical University of Denmark
Panu Mustakallio Professor of Practice, Aalto University
Peter V. Nielsen Professor emeritus, Aalborg University
Bjarne W. Olesen Professor, DTU - Technical University of Denmark
Thomas Olofsson Professor, Umeå University
Pertti Pasanen Director, University of Eastern Finland
Svein Ruud Tekn. Lic., Senior expert, RISE Research Institutes of Sweden
Sasan Sadrizadeh Professor, KTH Royal Institute of Technology and Mälardalens University
Peter Schild Professor, OsloMet - Oslo Metropolitan University
Olli Seppänen Professor emeritus, Aalto University
Martin Thalfeldt Professor, TalTech - Tallinn University of Technology
Pawel Wargocki Associate Professor, DTU - Technical University of Denmark
Siru Lönnqvist secretary general, VVS Föreningen i Finland and SCANVAC

Kluczowi współtwórcy:

Jarek Kurnitski Professor, TalTech - Tallinn University of Technology
Amar Aganovic Associate Professor, UiT The Arctic University of Norway
Peter Schild Professor, OsloMet - Oslo Metropolitan University
Olli Seppänen Professor emeritus, Aalto University