

Prawdopodobieństwo przenoszenia wirusa SARS-CoV-2 drogą powietrzną w pomieszczeniach wentylowanych

Probability of airborne transmission of SARS-CoV-2 virus in ventilated rooms

PAWEŁ SZALAŃSKI, WOJCIECH CEPIŃSKI

DOI 10.36119/15.2022.2.5

Wykorzystując model Wellsa-Rileya, dla różnych typów pomieszczeń, wyznaczono prawdopodobieństwo transmisji drogą powietrzną i współczynnik reprodukcji koronawirusa SARS-CoV-2 (wraz z wariantami Delta i Omikron) w zależności od rodzaju wentylacji i strumienia powietrza zewnętrznego. Analizy przeprowadzono dla, przyjmowanych w literaturze i polskich przepisach, strumieni powietrza dla wybranych typów pomieszczeń oraz dla dopuszczalnej lub standardowej liczby przebywających w nich osób. Uwzględniono różne scenariusze zakładając typowy czas przebywania osób w danych rodzajach pomieszczeń. Określono również wpływ wprowadzanych zasad bezpieczeństwa i stosowania maseczek ochronnych na przenoszenie choroby COVID-19 drogą powietrzną w pomieszczeniach.

Słowa kluczowe: wentylacja, powietrze zewnętrzne, HVAC, koronawirus SARS-CoV-2, wariant Delta, wariant Omikron, COVID-19

Using the Wells-Riley model, for different types of rooms, the probability of airborne transmission and reproduction number of SARS-CoV-2 coronavirus (together with Delta and Omicron variants) depending on the type of ventilation and outdoor air flow rate were determined. The analyses were carried out for air flows assumed in the literature and Polish regulations for particular types of rooms and for the permissible or standard number of persons occupying them. Various scenarios was also determined and considered assuming typical time of occupancy in particular types of rooms. The influence of safety rules was also determined and the use of protective masks on the COVID-19 disease transmission by air in rooms.

Keywords: ventilation, outdoor air, HVAC, SARS-CoV-2 coronavirus, Delta variant, Omicron variant, COVID-19

Wprowadzenie

Od grudnia 2019 pandemia koronawirusa SARS-CoV-2 atakuje cały świat na niespotykaną dotąd skalę i w niebywałym tempie. Wymaga to podejmowania wielu działań w celu jak najszybszego zatrzymania rozprzestrzeniania się COVID-19, zwłaszcza spowodowanego przez nowe stale pojawiające się zmutowane warianty. Odpowiednie stosowanie kontroli inżynierskich może istotnie pomóc w realizacji tego celu. Ponieważ droga powietrzna jest ważnym sposobem przenoszenia zakaźnych chorób układu oddechowego [1], [2], do wsparcia skutecznej kontroli inżynierskiej użyteczne są modele matematyczne przenoszenia zakażeń drogą powietrzną. Wykorzystanie istniejących modeli może być pomocne w kontrolowaniu ryzyka infekcji, co jest ważne dla zapobiegania rozprzestrzenianiu się

COVID-19 i innych zakaźnych chorób układu oddechowego.

Podstawową kwestią poruszaną w literaturze i zaleceniach w analizie układów wentylacyjnych w kontekście wirusa SARS-CoV-2 [3]–[16] jest konieczność zapewnienia wysokiej krotności wymian powietrza zewnętrznego w pomieszczeniach. Ma to na celu zwiększenie efektu rozcieńczenia zanieczyszczeń mikrobiologicznych w powietrzu wewnętrznym.

W najnowszych publikacjach analizowane prawdopodobieństwo infekcji w różnych pomieszczeniach jest ujmowane ilościowo, z uwzględnieniem rodzaju wentylacji i innych czynników [17]–[20]. W tym celu wykorzystywany jest szeroko opisywany w literaturze model przenoszenia chorób zakaźnych drogą powietrzną Wellsa-Rileya oraz współczynnik reprodukcji wirusa R. Brakuje jednak podobnych analiz i publikacji w warunkach pol-

skich. Dlatego poniżej przeanalizowano jak rodzaj wentylacji i wartość strumienia powietrza zewnętrznego określona polskimi przepisami wpływa na prawdopodobieństwo zakażenia. Obliczenia przeprowadzono przy standardowym zagęszczeniu ludzi w danym typie pomieszczenia, z uwzględnieniem najnowszych wariantów koronawirusa, różnych scenariuszy i wpływu środków ochrony, takich jak maseczki oraz krajowych wymagań i zasad bezpieczeństwa.

Materiały i metody

Obliczenia przeprowadzono wykorzystując model przenoszenia chorób zakaźnych drogą powietrzną Wellsa-Rileya skalibrowany na różne warianty wirusa SARS-CoV-2 (wykorzystując między innymi równania w postaci przedstawionej w [20], [21]) oraz wyznaczono

dr inż. Paweł Szalański <https://orcid.org/0000-0001-9263-3486>, dr inż. Wojciech Cepiński <https://orcid.org/0000-0003-4294-0431> – Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Wrocław. Adres do korespondencji: pawel.szalanski@pwr.edu.pl, wojciech.cepinski@pwr.edu.pl

wpływ tego prawdopodobieństwa na współczynnik reprodukcji wirusa R . W obliczeniach nie uwzględniono innych dróg przenoszenia wirusa.

Model Wellsa-Rileya

Model Wellsa-Rileya [22] jest prostym modelem przenoszenia chorób zakaźnych drogą powietrzną opracowanym przez Williama F. Wellsa i Richarda L. Rileya i może być również, po odpowiednim skalibrowaniu, stosowany w przypadku COVID-19 [17]–[20]. Jest zwykle wykorzystywany do przewidywania liczby nowych przypadków zakażenia, w danym czasie, w środowisku wewnętrznym wentylowanym statym strumieniem powietrza.

Prawdopodobieństwo zakażenia można obliczyć dla różnych czynności i pomieszczeń z prawidłowym natężeniem źródła E (kwant/h), tj. wskaźnikami emisji kwantów. Kwant jest definiowany jako dawka zakaźnych cząstek unoszących się w powietrzu, która w oparciu o rozkład Poissona, powoduje prawdopodobieństwo zakażenia 63,2% podatnych osób. Zakłada się, że cząstki te, przenoszone drogą powietrzną, są równomiernie rozmieszczone w powietrzu w pomieszczeniu zamkniętym. Ze stosowania tego modelu wynikają również inne uproszczenia i ograniczenia [21]. Model zakłada, że kwanty są emitowane przez osoby zakażone (zazwyczaj jedna) przez cały czas ich obecności. Zakaźne kwanty są usuwane równomiernie z całego pomieszczenia wraz z powietrzem wentylującym, ale również w wyniku osadzania i rozpadu cząstek wirusa.

W modelu Wellsa-Rileya prawdopodobieństwo zakażenia p wynika z liczby wdychanych kwantów n , co wynika z równań przedstawionych w [20], [21]:

$$p = \frac{N_c}{N_s} = 1 - e^{-n}$$

Gdzie N_c stanowi liczbę nowych chorób, N_s to liczba osób podatnych na zakażenie, natomiast liczba wdychanych kwantów n (kwant/h) to [20], [21]:

$$n = C_{avg} Q_b (1 - \eta_s) D$$

Gdzie Q_b (m^3/h) to objętościowe natężenie oddechu osoby podatnej przebywającej w pomieszczeniu (tabela 4), η_s to efektywność maseczki u osoby podatnej (0 dla braku maski), D (h) to czas przebywania osoby podatnej w pomieszczeniu, a C_{avg} (kwant/(m^3/h)) to średnie stężenie kwantów w powietrzu w pomieszczeniu. Stężenie kwantów zmienia się w czasie. Zakładając, że stężenie początkowe jest

równe 0, średnie stężenie kwantów po czasie D można wyznaczyć z równania [20], [21], [23]:

$$C_{avg} = \frac{E}{\lambda V} \left[1 - \frac{1}{\lambda D} (1 - e^{-\lambda D}) \right]$$

Gdzie V (m^3) to kubatura pomieszczenia, λ (h^{-1}) to sumaryczny współczynnik usuwania wirusa składający się z części: λ_v (h^{-1}) wynikającej z oddziaływania wentylacji, λ_{dep} (h^{-1}) wynikającej z osadzania wirusa na powierzchniach, k (h^{-1}) wynikającej z dezaktywacji wirusa oraz k_f (h^{-1}) wynikającej z filtrowania powietrza w pomieszczeniu:

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_{dep} + k + k_f$$

Natomiast emisję kwantów E (kwant/h) można wyznaczyć z zależności [20], [21]:

$$E = (1 - \eta_i) I q$$

Gdzie I to liczba osób zakażających, η_i to efektywność maseczki u osoby zakażającej (0 dla braku maski), a q (kwant/(h-os.)) to emisja kwantów od jednej osoby zakażającej. Wartość ta w zależności od rodzaju i wariantu patogenu jest różna. W przypadku wirusa SARS-CoV-2 w kolejnych wersjach kalkulatorów [21] i [24] wprowadzono współczynnik korekcyjny zmieniający emisję kwantów w zależności od wariantu wirusa. Po jego uwzględnieniu (oznaczając go jako f_{var} na podstawie [25]), powyższe równanie przybierze postać:

$$E = (1 - \eta_i) I q f_{var}$$

Stosowanie modelu Wellsa-Rileya jest rozwijane i uszczegóławiane w kolejnych publikacjach i kalkulatorach ryzyka zakażenia drogą powietrzną [21], [24]. Oprócz przedstawionego w przywołanych powyżej równaniach, sposobu uwzględniania wpływu maseczek, w kalkulatorze REHVA [21] przedstawiono również sposób uwzględniania wpływu przenośnych oczyszczaczy powietrza i przewidziano możliwość uwzględnienia innych działań zwiększających współczynnik usuwania wirusa λ (h^{-1}), np.: dezynfekcja, czy UV-C [26], [27].

Współczynnik reprodukcji wirusa R

Celem śledzenia zdolności danego wirusa do rozprzestrzeniania się wśród ludzi epidemiolodzy wykorzystują współczynnik reprodukcji wirusa R_0 :

$$R_0 = \frac{N_c}{I}$$

Gdy $R_0 > 1,0$ epidemia się rozwija, natomiast choroba zanika, gdy $R_0 < 1,0$ [28]. Można założyć w uproszczeniu, że

jedna osoba zaraża średnio tyle kolejnych osób, ile wynosi współczynnik R_0 . Gdy współczynnik reprodukcji wirusa utrzymuje się na odpowiednio niskim poziomie przez dłuższy czas, epidemia stopniowo wygasa.

Współczynnik reprodukcji pojedynczego zdarzenia wyznaczono po przekształceniu zależności przedstawionej w [21]:

$$p = \frac{R_I}{N_s}$$

Zgodnie z założeniem przyjętym w [21], aby utrzymać bazowy współczynnik reprodukcji $R_0 < 1,0$, współczynnik reprodukcji dla pojedynczego zdarzenia R , powinien być mniejszy od R_0 . Ponieważ osoby podatne mogą być narażone na więcej niż jedno zdarzenie, prawdopodobieństwo zakażenia i współczynnik reprodukcji dla pojedynczego zdarzenia należy utrzymywać na możliwie niskim poziomie [18], [20], [21], [26].

Założenia do analizy

W prezentowanej analizie rozpatrzono tylko powietrzną drogę rozprzestrzeniania się wirusa. Wykorzystując opisany powyżej model Wellsa-Rileya i współczynnik reprodukcji wirusa dla pojedynczego zdarzenia (R), dla różnych rodzajów pomieszczeń, dokonano oceny prawdopodobieństwa transmisji koronawirusa SARS-CoV-2 i choroby COVID-19 drogą powietrzną w zależności od rodzaju wentylacji i strumienia powietrza zewnętrznego. Analizy przeprowadzono dla pomieszczeń typu: biuro indywidualne, biuro wielkopowierzchniowe, sala konferencyjna, audytorium, restauracja, sala lekcyjna, dom towarowy i mieszkanie jednopokojowe.

Analizy przeprowadzono dla przyjmowanych w literaturze i wymaganych przepisami strumieni powietrza dla poszczególnych typów pomieszczeń oraz dla dopuszczalnej lub standardowej liczby przebywających w nich osób. W tabeli 1. zestawiono te wartości, podając ich źródła. Zagęszczenie ludzi w pomieszczeniach wyrażono powierzchnią podłogi przypadającą na jedną osobę. Dla rodzajów pomieszczeń, dla których Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [29] podaje liczbę użytkowników (w odniesieniu do powierzchni podłogi), na którą należy projektować drogi ewakuacyjne, przyjęto te wartości dopuszczalne jako zagęszczenie pomieszczeń. Dla pomieszczeń, dla których rozporządzenie [29] nie podaje tych wartości, przyjęto standardowe zagęszczenie użytkowników z normy PN-EN 15251:2012

Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę [30] (aktualnie wycofana) dla kategorii II pomieszczeń. Liczbę osób w poszczególnych pomieszczeniach wyznaczono na podstawie przyjętej powierzchni pomieszczeń (tabela 1) i przyjętego zagęszczenia użytkowników. Dla przypadków z pomieszczeniami wentylowanymi naturalnie, krotność wymian powietrza zewnętrznego przyjęto równą $0,5\text{h}^{-1}$, dla stanu po lockdownie (intensywniejsze wietrzenie) zgodnie z publikacjami [17,18]. Strumień powietrza zewnętrznego dla pomieszczeń nieklimatyzowanych przyjęto na podstawie rozporządzenia [29], a dla pomieszczeń klimatyzowanych i wentylowanych bez otwieranych okien przyjęto na podstawie przywołanej w tym rozporządzeniu normy PN-83/B-03430 *Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej Wymagania wraz ze zmianą PN-83/B-03430/Az3 luty 2000 r.* [31]. Wysokość wszystkich pomieszczeń, oprócz mieszkania jednopokojowego, przyjęto równą 3,0 m. Dla mieszkania jednopokojowego przyjęto 2,5 m.

Tabela 1. Zagęszczenie osób, krotność wymian dla wentylacji naturalnej, strumień powietrza dla wentylacji mechanicznej, powierzchnie pomieszczeń i liczba osób przyjęte w wariancie podstawowym
Table 1. The density of occupants, the air exchange rate for natural ventilation, the air flow rate for mechanical ventilation, the floor areas of the rooms and the number of people assumed for the basic variant

Rodzaj budynku lub pomieszczenia	Powierzchnia podłogi na osobę	Krotność wymian dla wentylacji naturalnej	Minimalny strumień powietrza zewnętrznego	Liczba osób	Powierzchnia pomieszczenia
	m^2/osoba				
Biuro indywidualne	5,0 [29]	0,5 [17] po lockdownie (intensywniejsze wietrzenie)	-	2	10
Biuro wielkopowierzchniowe				10	50
Sala konferencyjna (spotkań)	1,0 [29]			12	12
Audytorium (sala wykładowa, teatr, itp.)	0,75 [30]			100	75
Restauracja	1,0 [29]			40	40
Sala lekcyjna	2,0 [30]			30	60
Dom towarowy	7,0 [30]			142	1000
Mieszkanie jednopok.	15	80 m^3/h [31]	2	30	

Przeanalizowano również wpływ wprowadzanych przez polski rząd zasad bezpieczeństwa [32] na prawdopodobieństwo zakażenia i współczynnik reprodukcji R . Uwzględniono następujące zasady bezpieczeństwa wprowadzone 15 grudnia 2021 r. dotyczące zagęszczenia osób niezaszczepionych [32]:

- centra handlowe i sklepy wielkopowierzchniowe – maks. 1 os. na 15m^2 (przyjęto dla domu towarowego),
- teatry, opery, filharmonie – maks. 30 % obłożenia, zapewnienie, aby w pomieszczeniu przebywała jednocześnie

nie więcej niż 1 osoba na 15m^2 jego powierzchni, konieczne jest zakrywanie ust i nosa (przyjęto dla audytorium),

- lokale gastronomiczne – maks. 30 % obłożenia lokalu (przyjęto dla restauracji).

Zestawienie założeń po uwzględnieniu powyższych zasad bezpieczeństwa przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zagęszczenie i liczba osób przyjęte w wariancie po uwzględnieniu zasad bezpieczeństwa

Table 2. Density and number of occupants assumed in the variant with safety rules

Rodzaj budynku lub pomieszczenia	Powierzchnia podłogi na osobę	Liczba osób
	m^2/osoba	osoba
Sala konferencyjna (spotkań)	1,0 [29]	12
Audytorium	2,25 [32]	30
Restauracja	3,0 [32]	12
Dom towarowy	14,0 [32]	42

Dla poszczególnych typów pomieszczeń przyjęto wybrane przykładowe scenariusze, uwzględniające typowy czas przebywania osób w tych rodzajach pomieszczeń. Poszczególne scenariusze zestawiono w tabeli 3. We wszystkich analizowanych scenariuszach założono obecność jednego zakażonego w pomiesz-

czeniu oraz, że wszystkie pozostałe osoby są zdrowe i podatne na zakażenie. Przyjęto, że w stanie początkowym w powietrzu w pomieszczeniu nie było wirusa i że zakażony i zdrowi przebywają przez cały przyjęty okres na stałe w pomieszczeniu.

Dla pomieszczeń audytorium i sali lekcyjnej przyjęto dwa warianty scenariuszy. W pierwszym osobą zakażoną i podatną jest słuchacz/uczeń, natomiast w drugim osobą zakażoną jest mówca/nauczyciel, a podatną słuchacz/uczeń. W każdym przypadku przyjęto, że osoba zakażona i podatna pojawiają się w pomieszczeniu w tym samym momencie.

Wartość współczynnika λ_{dep} (h^{-1}) wynikającego z osadzania wirusa na powierzchniach podawana w literaturze zmienia się od $0,24\text{h}^{-1}$ do $1,5\text{h}^{-1}$ [18], [23]. Do analiz przyjęto wartość $0,24\text{h}^{-1}$ za [17], [18]. Z przeglądu literatury przedstawionego w [26] wynika, że w zależności od warunków środowiskowych, współczynnik dezaktywacji wirusa k (h^{-1}) wynosi od 0 do 1h^{-1} . Do przedstawionych analiz za [17], [18], [21] przyjęto wartość $0,63\text{h}^{-1}$ na podstawie okresu półtrwania SARS – CoV-2 (1,1 h) wykrytego przez van Doremalen et al. [33]. Wartość współczynnika k_f (h^{-1}) wynikającego z filtrowania powietrza w pomieszczeniu przyjęto równą 0 (dla braku filtracji powietrza w pomieszczeniu). Ponadto na podstawie [34], przyjęto, że typowe filtry zgrubne i o średniej efektywności, stosowane w centralach wentylacyjnych, normalnie nie filtrują efektywnie materiału wirusowego. Za [17], [18], [21] współczynnik wynikający z działania wentylacji λ_v (h^{-1}) przyjęto jako krotność wymian powietrza zewnętrznego. Dla wentylacji naturalnej wartość przyjęto za [17], a dla wentylacji mechanicznej wyznaczono ją na podstawie przyjętych strumieni powietrza (tabela 1), zakładając idealne wymieszanie powietrza nawiewanego w całej kubaturze pomieszczenia oraz brak recyrkulacji i zawracania do pomieszczeń powietrza wywiewanego przez nieszczelności w układzie wentylacyjnym.

Tabela 3. Zestawienie scenariuszy przebywania osób w pomieszczeniach
Table 3. Indoor occupancy scenarios

Rodzaj budynku lub pomieszczenia	Osoba zakażona	Osoba podatna	Czas przebywania osoby zakażonej	Czas przebywania osoby podatnej
			h	h
Biuro indywidualne	pracownik	pracownik	8	8
Biuro wielkopowierzchniowe	pracownik	pracownik	8	8
Sala konferencyjna (spotkań)	uczestnik	uczestnik	2	2
Audytorium	słuchacz	słuchacz	2	2
	mówca	słuchacz		
Restauracja	gość	gość	2	2
Sala lekcyjna	uczeń	uczeń	2	2
	nauczyciel	uczeń		
Dom towarowy	klient	klient	1	1
Mieszkanie jednopok.	mieszkaniec	mieszkaniec	12	12

Wartości objętościowego natężenia oddechu Q_b (m^3/h) osoby podatnej przebywającej w pomieszczeniu wyznaczono na podstawie danych z [35], [36], wykorzystywanych w [19], [21], [24]: odpoczynek 0,49 m^3/h , pozycja stojąca i aktywność siedząca 0,54 m^3/h , lekki wysiłek 1,38 m^3/h , lekki wysiłek i mówienie na głos 1,38 m^3/h . Uwzględniono udziały rodzajów aktywności różnych użytkowników pomieszczeń za [21]. Udziały rodzajów aktywności i wyznaczone wartości zestawiono w tabeli 4.

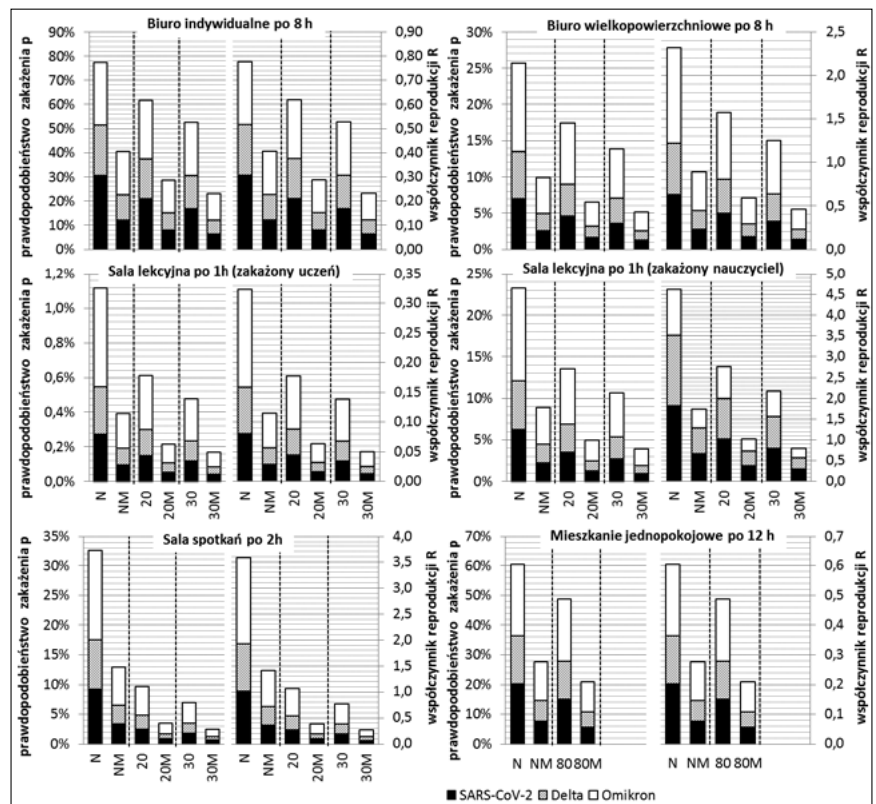
Do wyznaczenia wartości emisji kwantów q (kwant/(h-os.)) przez osobę zakażoną przyjęto wartości ER_q dla 60. percentyla (za [21]), zaktualizowane w [19] i wykorzystywane w kalkulatorze [24]: odpoczynek i oddech przez usta – 1,7 kwant/(h-os.), pozycja stojąca i oddech przez usta – 4,8 kwant/(h-os.), odpoczynek i mówienie – 7,7 kwant/(h-os.), pozycja stojąca i mówienie – 8,4 kwant/(h-os.), lekki wysiłek i mówienie – 21,6 kwant/(h-os.), pozycja stojąca i głośne mówienie – 62 kwant/(h-os.). Warto zwrócić uwagę, że do wyznaczania wartości granicznych/dopuszczalnych w literaturze używane są często dane dla 90. percentyla [20], [24]. Uwzględniono również udziały rodzajów aktywności użytkowników pomieszczeń za [21]. Udziały rodzajów aktywności i wyznaczone wartości zestawiono w tabeli 4.

Mutacje SARS-CoV-2 uwzględniono przez wartość współczynnika korekcyjnego f_{var} zależnego od wariantu wirusa [25]. Do analiz przyjęto podstawowego

Tabela 4. Przyjęte objętościowe natężenia oddechu osób podatnych na zakażenie i emisje kwantów przez osoby zakażone

Table 4. Assumed volumetric inhalation rates of susceptible persons and quantum emissions by infected persons

	Wartość objętościowego natężenia oddechu osoby podatnej Q_b , m^3/h	Emisja kwantów SARS-CoV-2, q (kwant/(h-osoba))	Opis aktywności osoby podatnej i zakażonej
Biuro indywidualne	0,71	2,9	80% aktyw. siedz. 20% lekka aktyw., mówienie na głos
Biuro wielkopowierzchniowe	0,71	2,9	80% aktyw. siedz. 20% lekka aktyw., mówienie na głos
Sala konferencyjna (spotkań)	0,88	4,1	60% aktyw. siedz. 40% lekka aktyw., mówienie na głos
Audytoryum (zakażony słuchacz, podatny słuchacz)	0,54	2,4	100% aktyw. siedz.
Audytoryum (zakażony mówca, podatny słuchacz)	0,54	56,0	zakażona: 100% mów. głośno na stojąco podatna: 100% aktyw. siedz.
Restauracja	0,79	3,5	30% aktyw. siedz. 70% lekka aktyw., mówienie na głos
Sala lekcyjna (zakażony uczeń, podatny uczeń)	0,62	2,4	10% aktyw. siedz. 90% lekka aktyw., mówienie na głos
Sala lekcyjna (zakażony nauczyciel, podatny uczeń)	0,62	56,0	zakażona: 100% mów. głośno na stojąco podatna: 10% aktyw. siedz., 90% lekka aktyw., mówienie na głos
Dom towarowy	1,38	8,2	20% lekka aktywność 80% lekka aktyw., mówienie na głos
Mieszkanie jednopokojowe	0,79	5,4	67% odpoczynek, 17% lekka aktyw., 16% lekka aktyw., mów. na głos



Rysunek 1. Wyniki obliczeń dla biura indywidualnego, biura wielkopowierzchniowego, sali lekcyjnej, sali spotkań i mieszkania jednopokojowego po założonym czasie N – wentylacja naturalna o krotności wymian powietrza zewnętrznego 0,5 h⁻¹; 20 – wentylacja strumieniem powietrza zewnętrznego 20 (m³/h)/os.; 30 – wentylacja strumieniem powietrza zewnętrznego 30 (m³/h)/os.; 80 – wentylacja strumieniem powietrza zewnętrznego 80 m³/h, M – maski materiałowe u osób zakażonych i podatnych
Figure 1. Calculation results for individual office, large office, classroom, meeting room and one-room dwelling after assumed time, N – natural ventilation with an outdoor air exchange rate of 0.5 h⁻¹; 20 – ventilation with an outdoor air flow of 20 (m³/h)/pers.; 30 – ventilation with an outdoor air flow of 30 (m³/h)/pers.; M – material masks for infected and susceptible persons

wirusa SARS-CoV-2 oraz jego mutację: Delta i Omikron. Dla wariantu Delta (za [21]) przyjęto wartość $f_{var} = 2,0$. Według

The Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA). Transmisyjność wariantu Omikron jest jeszcze przedmiotem aktualnych dynamicznych badań. Według [37], w stosunku do wariantu Delta jest ona o +105% większa, choć w publikacjach [38], [39] podawane są wyższe wartości, ale w stosunku do innych poziomów odniesienia. Jednak do prezentowanych obliczeń, dla wariantu Omikron przyjęto $f_{var} = 4,1$, wyznaczone na podstawie [37].

Do obliczeń przyjęto wartości skuteczności najmniej efektywnych maseczek materiałowych (za [21]) według [40]: dla osoby zakażonej $\eta_i = 0,5$, dla osoby podatnej $\eta_s = 0,3$.

Analiza wyników

Wyniki obliczeń prawdopodobieństwa zakażenia p i współczynnika reprodukcji dla pojedynczych zdarzeń/scenariuszy R przeprowadzonych na podstawie powyższych założeń przedstawiono na wykresach na rysunkach 1 i 2. Poszczególne wykresy kolumnowe dotyczą poszczególnych pomieszczeń po założonym czasie. Dla sali lekcyjnej i audytoryum przedstawiono

wykresy w dwóch wariantach scenariuszy (zakazony słuchacz/uczeń i zakazony mówca/nauczyciel). Na rysunku 2., dla pomieszczeń, których dotyczyły zasady bezpieczeństwa z 15.12.2021 r. [32] przedstawiono również wyniki obliczeń po uwzględnieniu tych zasad.

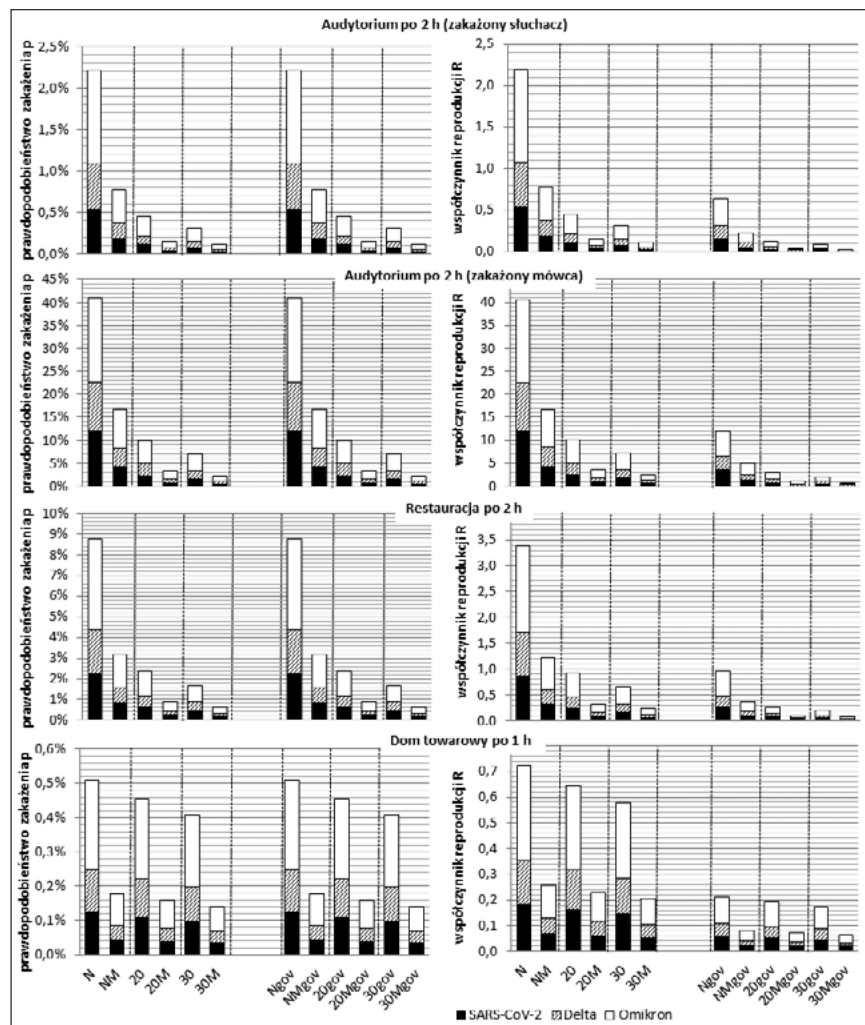
11,5%, dla wariantu Delta to 21,8%, natomiast dla wariantu Omikron to 39,5%).

Analizując wykresy na rysunku 1 i 2 można zauważyć, że:

– największą wartość prawdopodobieństwa zakażenia uzyskano w pomieszczeniach typu: biuro indywidualne po

1 h z zakazonym uczniem (do 1,1%), a najmniejsze w domu towarowym po 1 h (do 0,5%),

- najwyższe wartości współczynnika reprodukcji R uzyskano dla: audytorium po 2 h z zakazonym mówcą (do 4,0),
- mniejsze wartości współczynnika R , ale wyższe od 1,0 uzyskano dla: sali lekcyjnej po 1 h z zakazonym nauczycielem (do 4,6), sali spotkań po 2 h (do 3,5), restauracji po 2 h (do 3,4), biuro wielkopowierzchniowe po 8 h (do 2,3), audytorium po 2 h z zakazonym słuchaczem (do 2,2),
- wartości współczynnika reprodukcji R z przedziału $0,5 \div 1,0$ uzyskano w pomieszczeniach typu: biuro indywidualne po 8 h (do 0,8), dom towarowy po 1 h (do 0,7), mieszkanie jednopokojowe po 12 h (do 0,6),
- najmniejsze wartości współczynnika reprodukcji, poniżej 0,5, uzyskano w pomieszczeniach typu: sala lekcyjna po 1 h z zakazonym uczniem (do 0,3),
- dla każdego pomieszczenia i scenariusza najmniejsze wartości prawdopodobieństwa zakażenia i współczynnika reprodukcji uzyskano dla podstawowego SARS-CoV-2, dla wariantu Delta do 2 razy większe, a dla wariantu Omikron do 4,1 razy większe,
- dla każdego pomieszczenia i scenariusza najmniejsze wartości prawdopodobieństwa zakażenia i współczynnika reprodukcji uzyskano dla wentylacji strumieniem powietrza zewnętrznego $30 \text{ (m}^3\text{/h)/os.}$ lub strumieniem $80 \text{ m}^3\text{/h}$ (dla mieszkania jednopokojowego), dla wentylacji strumieniem $20 \text{ (m}^3\text{/h)/os.}$ od 1,12 do 1,43 razy większe, a dla wentylacji naturalnej z $0,5 \text{ h}^{-1}$ z wymianą powietrza zewnętrznego od 1,25 do ponad 7 razy większe,
- dla każdego pomieszczenia i scenariusza mniejsze wartości prawdopodobieństwa zakażenia i współczynnika reprodukcji uzyskano w przypadku stosowania maseczek, a w przypadku ich braku były od 1,91 do 2,86 razy większe,
- dla audytorium (np.: kino, teatr), restauracji, domu towarowego mniejsze wartości współczynnika reprodukcji uzyskano po zastosowaniu zasad bezpieczeństwa dotyczących zmniejszenia zagęszczenia osób, a bez ich uwzględnienia do 3,55 razy większe,
- dla audytorium (np.: kino, teatr) i sali lekcyjnej mniejsze wartości prawdopodobieństwa zakażenia i współczynnika reprodukcji uzyskano w sytuacji, kiedy osobą zakażoną był słuchacz/uczeń, a w sytuacji, kiedy osobą zaka-



Rysunek 2.

Wyniki obliczeń dla audytorium, restauracji i domu towarowego po założonym czasie N – wentylacja naturalna o krotności wymian powietrza zewnętrznego $0,5 \text{ h}^{-1}$; 20 – wentylacja strumieniem powietrza zewnętrznego $20 \text{ (m}^3\text{/h)/os.}$; 30 – wentylacja strumieniem powietrza zewnętrznego $30 \text{ (m}^3\text{/h)/os.}$; M – maski materiałowe u osób zakażonych i podatnych; gov – wprowadzenie zasad bezpieczeństwa z 15.12.2021 r.

Figure 2. Calculation results for auditorium, restaurant and department store after assumed time N – natural ventilation with an outdoor air exchange rate of $0,5 \text{ h}^{-1}$; 20 – ventilation with an outdoor air flow of $20 \text{ (m}^3\text{/h)/pers.}$; 30 – ventilation with an outdoor air flow of $30 \text{ (m}^3\text{/h)/pers.}$; M – material masks for infected and susceptible persons; gov – implementation of safety rules from 15.12.2021

Na wykresach kolumnowych dla danego pomieszczenia/scenariusza, poszczególne kolumny dotyczą innego rodzaju wentylacji i stosowania lub niestosowania maseczek ochronnych (patrz oznaczenia pod rysunkami 1 i 2). Na każdej kolumnie zaznaczono trzy wartości odpowiadające trzem wariantom wirusa: podstawowy SARS-CoV-2, wariant Delta i wariant Omikron (przykład dla biura indywidualnego z wentylacją naturalną bez maseczek: prawdopodobieństwo zakażenia dla SARS-CoV-2 to

8 h (do 78 %) i mieszkanie jednopokojowe po 12 (do 60 %), audytorium po 2 h z zakazonym mówcą (do 42 %), sala spotkań po 2 h (do 32 %) oraz sala lekcyjna po 1 h z zakazonym nauczycielem (do 24 %),

– wartości mniejsze uzyskano w pomieszczeniach: restauracja po 2 h (do 9 %),

– najmniejsze prawdopodobieństwa zakażenia uzyskano w pomieszczeniach typu: audytorium 2h z zakazonym słuchaczem (do 2,2 %), sala lekcyjna po

zoną był mówca/nauczyciel około 22 razy większe.

Wnioski

Dla przyjętych założeń, niezależnie od rodzaju analizowanego pomieszczenia i przyjętego dla niego scenariusza wpływ na wartość prawdopodobieństwa transmisji i współczynnika reprodukcji mają: czas przebywania osoby chorej i podatnej w pomieszczeniu, zagęszczenie osób w pomieszczeniach, strumień powietrza wentylującego, stosowanie maseczek ochronnych oraz wariant wirusa. Prawdopodobieństwo zakażenia i współczynnik reprodukcji maleją wraz ze wzrostem strumienia powietrza wentylującego i po zastosowaniu maseczek ochronnych. Wynika to z faktu, że czas usuwania zanieczyszczeń z pomieszczeń jest odwrotnie proporcjonalny do liczby wymian powietrza w pomieszczeniu, a zmniejszenie stężenia patogenu i czasu ekspozycji na niego zmniejsza ryzyko zachorowania. W obliczeniach, na podstawie [17,18], przyjęto dla wentylacji naturalnej $0,5 \text{ h}^{-1}$ wymianę powietrza, jako charakterystyczną dla okresu w trakcie lockdownu. Należy, jednak mieć na uwadze, że według [17,18], krotkość tą przed lockdownem zakładano $0,2 \text{ h}^{-1}$ (mniej intensywne wietrzenie). Na podstawie dodatkowych obliczeń stwierdzono, że zmniejszenie krotkości wymian do tej wartości spowodowałoby wzrost prawdopodobieństwa zakażenia i współczynnika reprodukcji od 0,07 do 2,86 razy w zależności od przypadku obliczeniowego. Natomiast maseczki powodują zmniejszenie emisji wirusa u osoby zakażonej, a u osoby podatnej zmniejszają dawkę wdychanego patogenu. Na podstawie dodatkowych obliczeń stwierdzono, że stosowanie maseczek N95, wyższej klasy (przyjmując ich efektywność na podstawie [40]: dla osoby zakażonej $\eta_i = 0,95$, dla osoby podatnej $\eta_s = 0,85$), zamiast maseczek materiałowych ($\eta_i = 0,5$ i $\eta_s = 0,3$ [40]) przyjętych do wyżej przedstawionych analiz, może spowodować obniżenie prawdopodobieństwa zakażenia i współczynnika reprodukcji o nawet ponad 46 razy w zależności od wariantu obliczeń. Prawdopodobieństwo zakażenia i współczynnik reprodukcji wzrasta też wraz ze wzrostem współczynnika f_{var} wariantu patogenu, stąd najwyższe wartości występują w przypadku wariantu Omikron, a najniższe w przypadku podstawowego SARS-CoV-2. Na współczynnik reprodukcji wpływ ma również liczba osób podatnych w pomieszczeniu. Przy stałym prawdopodobieństwie zakażenia, współczynnik reprodukcji wirusa maleje wraz z malejącą liczbą osób podatnych.

Dlatego niekorzystnymi sytuacjami są takie, gdy ludzie mówią głośno wśród dużej liczby innych osób.

Na prawdopodobieństwo zakażenia i współczynnik reprodukcji wpływ ma również rodzaj wykonywanej czynności przez osobę zakażoną oraz przez osoby podatne. Wartości tych wielkości rosną wraz z intensywnością oddechową (wysiłek, mówienie) osób w pomieszczeniach. Osoba podatna jest tym bardziej narażona, im intensywniej oddycha. Natomiast osoba zakażona również tym więcej emituje patogenu, im intensywniej oddycha, np.: mówca jest bardziej narażony i intensywniej emituje patogen.

W zastosowanym powyżej modelu obliczeniowym założono idealne wymieszanie powietrza, zarówno z punktu widzenia rozprzestrzeniania się patogenu, jak również z punktu widzenia dystrybucji powietrza zewnętrznego w pomieszczeniu. W warunkach rzeczywistych procesy te nie zachodzą jednak w ten sposób. Wymiana powietrza nie następuje w sposób doskonały. Zależnie od systemu organizacji wymiany powietrza lepiej bądź gorzej są wentylowane poszczególne jego strefy. Próby uwzględnienia efektywności wentylacji podjęto w [26]. Można w ten sposób w uproszczeniu uwzględnić wpływ skuteczności dostarczania powietrza zewnętrznego przez system wentylacyjny do strefy przebywania ludzi. Jednak ważny jest również kierunek przepływu powietrza i ryzyko tworzenia tak zwanych „martwych stref”. Emisja patogenu również nie zachodzi równomiernie w całej kubaturze pomieszczenia, a jej źródła są zlokalizowane, a czasami skupione w konkretnych miejscach (lokalne zagęszczenie osób). Te kwestie można uwzględnić dopiero poprzez symulacje numeryczne CFD. Dlatego należy mieć na uwadze, że w różnych częściach pomieszczenia stężenia patogenu mogą być większe niż wyznaczone w powyższych obliczeniach. Ponadto należy spodziewać się, że prawdopodobieństwo zakażenia dla osób zaszczepionych, zależnie od typu szczepionki i schematu szczepienia, będzie niższe od obliczonego, niemniej jednak przy nowych wariantach patogenu, część zaszczepionych osób może być również podatna. Wrażliwą daną jest transmisyjność poszczególnych wariantów wirusa, ponieważ dane te są wyznaczane na bieżąco dla różnych poziomów odniesienia i różnią się w poszczególnych publikacjach. W związku z powyższymi kwestiami, przedstawione wyniki pozwalają jedynie ocenić prawdopodobieństwo zakażenia tylko drogą powietrzną i wynikający z niego współczynnik reprodukcji wirusa (w obliczeniach nie uwzględniono innych dróg prze-

noszenia wirusa) przy przyjętych założeniach i uproszczeniach. Powyższe należy wziąć pod uwagę przy analizowaniu rzeczywistych scenariuszy i podejmowaniu konkretnych działań przyjmując odpowiedni bufor bezpieczeństwa.

Podsumowanie

Do szacowania ryzyka infekcji w pomieszczeniach, mającego na celu ograniczenie rozprzestrzeniania się chorób zakaźnych, wykorzystywane są modele obliczeniowe skalibrowane do danego patogenu. Dysponując odpowiednimi danymi, obliczenia można przeprowadzać w celu orientacyjnego porównywania zakładanych scenariuszy i działań mających na celu ograniczenie transmisji. Może to ułatwić podejmowanie decyzji o wyborze środków zaradczych. Należy jednak pamiętać, że do ich przeprowadzenia potrzebne są właściwe dane wejściowe, które ze względu na rozwijającą się pandemię muszą być aktualizowane dla pojawiających się ciągle nowych mutacji wirusa.

Wyniki przedstawionych obliczeń, wskazują na znacznie większe prawdopodobieństwo zakażenia i współczynnik reprodukcji dla rozprzestrzeniającego się obecnie na świecie wariantu Omikron, w stosunku do wcześniejszych wariantów. Biorąc ponadto pod uwagę pojawiające się różne informacje na temat skuteczności szczepień w stosunku do tego wariantu, warto jeszcze bardziej zwrócić uwagę na działania skutecznie ograniczające rozwój pandemii: stosowanie dystansu społecznego, zmniejszanie zagęszczenia osób w pomieszczeniach, skracanie czasu przebywania w pomieszczeniach z dużą liczbą osób oraz szczególnie prawidłowe noszenie maseczek o wysokiej efektywności. W pomieszczeniach, gdzie przebywa się długo i ciągle noszenie maseczek jest trudne do osiągnięcia, istotną rolę pełni również wentylacja możliwie dużym strumieniem powietrza zewnętrznego i intensywne wietrzenie pomieszczeń. Szczególnie w takich pomieszczeniach oraz w takich o małą skuteczną wentylację, należy rozważyć również inne środki techniczne, na przykład: przegrody oddzielające, wentylacja spersonalizowana, pomieszczeniowe oczyszczacze powietrza, maseczki o wysokiej efektywności (np. N95, FFP2 lub FFP3), czy dezynfekcja UV-C.

REFERENCES

- [1] 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.abg2025.

- [2] L. Morawska and D. K. Milton, "It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19," *Clin. Infect. Dis.*, vol. 2019, no. Xx, pp. 1–4, 2020, doi: 10.1093/cid/ciaa939.
- [3] REHVA, "REHVA COVID-19 guidance document, March 17, 2020".
- [4] Eurovent Middle East, "COVID-19 Recommendations for Air Filtration and Ventilation," 2020.
- [5] E. and M. G. EMG, "Role of Ventilation in Controlling SARS-CoV-2 Transmission," *Sage*, pp. 2–33, 2020, [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/emg-role-of-ventilation-in-controlling-sars-cov-2-transmission-30-september-2020>
- [6] L. Morawska et al., "How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimized?," *Environ. Int.*, vol. 142, no. April, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105832.
- [7] A. J. Vol and F. Busato, "Remarks on the air recirculation in HVAC systems during the SARS-CoV-2 outbreak: the case of all-air ducted plants," pp. 50–55.
- [8] 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.
- [9] CIBSE COVID-19 VENTILATION GUIDANCE, no. May. 2020.
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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
- [13] 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>.
- [14] P. Szałański, W. Capiński, and J. Misiński, "Przegląd zaleceń dla instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w związku z zagrożeniem koronawirusem SARS-CoV-2 i chorobą COVID-19," *INSTAL*, vol. 5, pp. 17–21, 2020, doi: 10.36119/15.2020.5.3.
- [15] W. Capiński, 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, pp. 28–36, 2020, doi: 10.36119/15.2020.6.3.
- [16] "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.
- [17] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quantitative assessment of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environ. Int.*, vol. 141, p. 105794, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>.
- [18] 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. August, p. 106112, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [19] A. Mikszewski, L. Stabile, G. Buonanno, and L. Morawska, "The airborne contagiousness of respiratory viruses: A comparative analysis and implications for mitigation," *Geosci. Front.*, vol. xxxx, p. 101285, 2021, doi: 10.1016/j.gsf.2021.101285.
- [20] J. Kurnitski et al., "Respiratory infection risk-based ventilation design method," *Build. Environ.*, vol. 206, no. September, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108387.
- [21] J. Kurnitski et al., "REHVA COVID-19 Ventilation Calculator documentation (version 2.0, August 1, 2021)," no. September, pp. 1–8, 2021.
- [22] E. C. Riley, G. Murphy, and R. L. Riley, "Airborne spread of measles in a suburban elementary school," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 107, no. 5, pp. 421–432, May 1978, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112560.
- [23] S. L. Miller et al., "Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event," *Indoor Air*, no. September, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1111/ina.12751.
- [24] A. Mikszewski, G. Buonanno, L. Stabile, A. Pacitto, and L. Morawska, *Airborne Infection Risk Calculator*. 2021.
- [25] H. Masterplan and B. Nederland, "Achtergronddocument: Indicator besmettingskansen via aerosolen (v 2.0) Gebruiksvoorwaarden", [Online]. Available: <https://indicatorbesmettingskansen.nl/downloads/2021-0002-achtergrond.pdf>
- [26] 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.
- [27] A. Trusz, "Redukcja zanieczyszczenia mikrobiologicznego w pomieszczeniach z zastosowaniem lampy przepływowej z promieniowaniem UV-C," *INSTAL*, vol. 12, pp. 36–40, 2021, doi: 10.36119/15.2021.12.5.
- [28] J. M. Carcione, J. E. Santos, C. Bagaini, and J. Ba, "A Simulation of a COVID-19 Epidemic Based on a Deterministic SEIR Model," *Front. Public Heal.*, vol. 8, no. May, 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00230.
- [29] Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, "Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z późniejszymi zmianami."
- [30] PN-EN 15251:2012 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- [31] PN-83/B-03430 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej Wymagania wraz z zmianą PN-83/B-03430/Az3 luty 2000.
- [32] <https://www.gov.pl/web/koronawirus/aktualne-zasady-i-ograniczenia,15.12.2021r>.
- [33] 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.
- [34] REHVA COVID-19 guidance document version 4.0.
- [35] W. C. Adams, "Measurement of Breathing Rate and Volume in Routinely Performed Daily Activities. Final Report. Human Performance Laboratory, Physical Education Department, University of California, Davis. Prepared for the California Air Resources Board," 1993. doi: 10.1097/00001648-199503000-00162.
- [36] B. Binazzi 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, doi: 10.1111/j.1748-1716.2006.01529.x.
- [37] M. T. Sofonea, V. Foulongne, L. Verdurme, S. Trombert, M. Roussel, and S. Alizon, "From Delta to Omicron: analysing the SARS-CoV-2 epidemic in France using variant-specific screening tests (September 1 to December 18, 2021)," pp. 1–9, 2022.
- [38] O. England et al., "Report 49: Growth, population distribution and immune escape of," no. December, pp. 1–10, 2021.
- [39] V. Thakur and R. Ratho, "OMICRON (B. 1. 1. 529): A new SARS-CoV-2 variant of concern mounting worldwide fear," *J. Med. Virol.*, vol. 1–4, 2021, doi: 10.1002/jmv.27541.
- [40] H. Ueki et al., "Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2," *mSphere*, vol. 5, no. 5, 2020, doi: 10.1128/msphere.00637-20.