

dr inż. Dobrosława Kaczorek¹⁾

ORCID: 0000-0001-5014-4326

dr hab. inż. Małgorzata Basińska, prof. PP^{2)*)}

ORCID: 0000-0001-6180-641X

Wpływ działania wentylacji w połączeniu z materiałami buforującymi wilgoć na wybrane parametry komfortu środowiskowego w żłobku

The impact of ventilation combining with moisture-buffering materials on selected parameters of environmental comfort in a nursery

DOI: 10.15199/33.2024.04.03

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacji wpływu działania systemów wentylacyjnych w połączeniu z buforowaniem wilgoci w przegrodach na jakość powietrza i komfort cieplny w żłobku. Symulacje przeprowadzono w programie WUFI Plus. Porównano działanie wentylacji mechanicznej z wentylacją grawitacyjną. Analizy wykazały, że sterowanie stężeniem CO₂ jest korzystniejsze w przypadku lokalnego komfortu, a buforowanie wilgoci w materiałach wpływa na zmniejszenie amplitudy zmian wilgotności w pomieszczeniu.

Słowa kluczowe: klimat wewnętrzny; jakość powietrza wewnętrznego; buforowanie wilgoci; systemy wentylacyjne.

Abstract. The article presents the results of simulations on the impact of ventilation systems combined with moisture buffering in partitions on air quality and thermal comfort in a nursery. The simulations were conducted using the WUFI Plus software. The performance of mechanical ventilation was compared with gravity ventilation. The analyses indicated that controlling CO₂ concentration is more favorable for local comfort, and moisture buffering in materials reduces the amplitude of humidity changes in the room.

Keywords: indoor climate; indoor air quality; moisture buffering; ventilation systems.

Jakość środowiska wewnętrznego jest ściśle powiązana z odpowiednim strumieniem powietrza wentylacyjnego doprowadzanego do pomieszczenia. Szczególnie wentylacja placówek opieki nad dziećmi wymaga dużego i stałego współczynnika wymiany powietrza, aby zapewnić dzieciom zdrowe i bezpieczne warunki sprzyjające ich rozwojowi. Niestety w wielu tego typu obiektach mamy do czynienia z wentylacją grawitacyjną, która nie zapewnia dostatecznej wymiany powietrza w pomieszczeniach lub ze względu na nieuszczelnności w obudowie budynku wpływa na zwiększone, nieuzasadnione zużycie ciepła w wyniku zwiększonej wymiany powietrza. Zapewnienie dobrej jakości powietrza w placówkach opieki nad dziećmi staje się zatem wyzwaniem.

Sale przeznaczone do opieki nad dziećmi mają swoją specyfikę. Standardowo przez kilka – kilkanaście godzin w ciągu dnia są zajęte przez grupę ok. 25 osób, a w pozostałym czasie pozostają nieużytkowane. Poza tym w salach opieki nad dziećmi nie mamy dodatkowych zysków wilgoci wynikających z prania, gotowania itp., natomiast pojawiają się zyski związane z obecnością użytkowników. Projekt wentylacji w tego typu placówkach powinien więc uwzględniać systemy DCV (ang. *demand controlled ventilation* DCV), które umożliwiają inteligentne dostosowywanie strumienia powietrza do rzeczywistych potrzeb [1, 2]. Dzięki zastosowaniu systemów DCV, wentylacja w placówkach opieki nad dziećmi może być elastyczna i efektywna oraz dostosowywać się do dynamicznie zmieniających się warunków eksploatacyjnych. Zastosowanie takiego rozwiązania może nie tylko wpłynąć na zmniejszenie kosztów energii, ale przede wszystkim na poprawę jakości powie-

trza w pomieszczeniu. Do innych rozwiązań należy wykorzystanie materiałów buforujących wilgoć. W literaturze znajdują się przykłady takich dodatkowych pasywnych rozwiązań, pozwalających na regulację wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu, przez zastosowanie odpowiednich materiałów do wykończenia powierzchni wewnętrznych [3 – 6]. Mało jest jednak przykładów, w których badano potencjał buforowania wilgoci w połączeniu z różnymi sposobami sterowania wentylacją. Wołoszyn i in. [7] przebadali wpływ połączenia systemu wentylacji sterowanego wilgotnością z materiałami buforującymi wilgoć w pomieszczeniach na klimat wewnętrzny oraz efektywność energetyczną budynku. Wyniki ich badań pokazały, że wentylacja sterowana poziomem wilgotności zmniejsza rozpiętość między minimalną a maksymalną wartością wilgotności względnej w powietrzu w pomieszczeniu i generuje oszczędności energii przez utrzymanie wilgotności względnej na wymaganym

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej

²⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

^{*)} Adres do korespondencji:

malgorzata.basinska@put.poznan.pl

poziomie. Wadą tego rodzaju wentylacji jest jednak to, że inne zanieczyszczenia (np. CO₂) mogą przekraczać wartości oczekiwane.

Chcąc dokonać oceny wybranych parametrów komfortu wewnętrznego w pomieszczeniu żłobka, porównaliśmy działanie systemu DCV, sterowanego stężeniem CO₂, z systemem wentylacji grawitacyjnej z zastosowaniem różnych materiałów wykończeniowych powierzchni wewnętrznych o predyspozycjach do buforowania wilgoci. W celu przeprowadzenia kompleksowej oceny poszczególnych rozwiązań wykorzystano oprogramowanie WUFI Plus [8], opracowane przez Fraunhofer Institute for Building Physics w Niemczech. Modele matematyczne i fizyczne programu WUFI Plus wykorzystują założenia przedstawione w pracy Künzela [9], natomiast metoda obliczeniowa WUFI jest zgodna z normą EN 15026 [10]. Walidację modelu przedstawiono m.in. w pracach [11 – 13].

Badania

Opis budynku. Wykonano model symulacyjny budynku żłobka zaprojektowanego i wybudowanego w latach siedemdziesiątych XX w., zlokalizowanego w Warszawie (52.13°N i 21.00°E) o typowym układzie konstrukcyjnym. Symulacje dotyczyły pomieszczenia będącego salą pobytu dzieci. Analizowane pomieszczenie znajduje się na drugiej, ostatniej kondygnacji. Jest to pomieszczenie skrajne o kubaturze 132 m³. Ściana zewnętrzna z oknami skierowana jest na południe. Charakterystykę cieplną budynku żłobka przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Opis przegród budowlanych

Table 1. Description of the building components

Rodzaj przegrody	Grubość całkowita [mm]	Współczynnik przenikania ciepła [W/(m ² K)]
Ściana zewnętrzna (orientacja zachodnia i południowa)	397,5	1,04
Dach płaski	263,5	0,42
Ściana wewnętrzna	263,5	2,06
Strop międzykondygnacyjny	310,5	0,89
Okno		2,53

W celu przeanalizowania wpływu efektu buforowania materiałów wykończeniowych na klimat wewnętrzny w pomieszczeniu, do analizy przyjęto dwa rodzaje wewnętrznych materiałów wykończeniowych – płytę gipsowo-kartonową oznaczoną jako A1 oraz tynk cementowo-wapienny oznaczony jako A2 o właściwościach cieplno-wilgotnościowych przedstawionych w tabeli 2. Założono dwa warianty powierzchni wewnętrznej materiału wykończeniowego – bez malowania (wariant – a) oraz z uwzględnieniem malowania akrylową farbą powierzchniową o współczynniku oporu dyfuzyjnego S_d = 0,5 m (wariant – b).

Tabela 2. Właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów wykończeniowych

Table 2. Properties of internal coverings

Parametr	A1 płyta gipsowo-kartonowa	A2 tynk cementowo-wapienny
λ [W/(mK)]	0,20	0,80
μ [-]	6,1	19,0

Właściwości cieplno-wilgotnościowe zastosowanych materiałów przyjęto z bazy danych programu WUFI Plus. Założono następujące warunki początkowe: temperaturę wewnętrzną – 20°C; wilgotność względną powietrza – 50%; stężenie CO₂ – 400 ppm. Analizy symulacyjne przeprowadzono w przypadku danych klimatycznych okresu od 1 września 2022 r. do 31 sierpnia 2023 r. z krokiem czasowym odpowiadającym 1 godzinie.

Charakterystyka użytkowa pomieszczenia. Z danych dotyczących profilu użytkowania żłobka pochodzących od jego personelu wynika, że pomieszczenie użytkowane jest w dni robocze,

od poniedziałku do piątku w godz. 6 – 17. Rano od godz. 6.00 dzieci zbierają się, a po południu od godz. 15.00 odbierane są przez rodziców. W związku z tym przyjęto: od 6.00 – 7.00 obecność jednej opiekunki i dwojga dzieci, od 7.00 do 8.00 obecność jednej opiekunki i dziesięciorga dzieci, a od 8.00 do 16.00 obecność dwóch opiekunek i piętnastorga dzieci, natomiast w godzinach od 16.00 do 17.00 obecność jednej opiekunki i pięciorga dzieci.

Przyjęte do obliczeń dzienne, godzinowe profile emisji ciepła przez konwekcję i radiację, wilgotność oraz produkcję CO₂ przedstawiono w tabeli 3, którą opracowano, wykorzystując dane pozyskane z programu symulacyjnego WUFI Plus. Zgodnie z opisem programu poszczególne wartości zostały wyznaczone wg norm: ASHRE 55 [14] w odniesieniu do emisji ciepła; IEA AN-NEX 41 [15] w odniesieniu do zysków wilgoci i ASHRAE 62 [16] w odniesieniu do emisji CO₂.

Charakterystyka systemu wentylacyjnego. W odniesieniu do rozwiązania systemu wentylacyjnego założono dwa scenariusze:

- V1 – wentylacja grawitacyjna z wymianą powietrza przez infiltrację na poziomie ACH = 0,5 1/h oraz z otwieraniem okien cztery razy dziennie na 10 min w godzinach od 6.00 do 6.10, 8.00 do 8.10, 11.00 do 11.10, 14.00 do 14.10, 16.30 do 17.00 przy założeniu wymiany powietrza w pomieszczeniu na poziomie 4 1/h (zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie wymagań lokalowych i sanitarnych, jakie musi spełniać lokal, w którym ma być prowadzony żłobek lub klub dziecięcy [17]);

Tabela 3. Profil użytkowy żłobka wraz z zyskiem ciepła i wilgoci oraz emisją CO₂

Table 3. Utility profile of the nursery with heat and moisture generation and emission of CO₂

Godziny użytkowania pomieszczenia	Zyski jawne (konwekcja) [W]	Zyski jawne (promieniowanie) [W]	Zyski utajone (wilgotność) [g/h]	Emisja CO ₂ [g/h]
6.00 – 7.00	168	84	161	81
7.00 – 8.00	552	276	529	265
8.00 – 9.00	864	432	828	415
9.00 – 11.00	1656	828	2215	754
11.00 – 12.00	864	432	828	415
12.00 – 14.00	624	312	483	340
14.00 – 15.00	864	432	828	415
15.00 – 16.00	1656	828	2215	754
16.00 – 17.00	312	156	299	150

• V2 – wentylacja na żądanie z priorytetem sterowania stężeniem CO₂ na poziomie nie wyższym niż 1500 ppm zgodnie z niemiecką normą DIN 1946-2 [18]. Strumień powietrza nawiewanego wyznaczony z jednostkowych strumieni powietrza na osobę zgodnie z profilem użytkowym pomieszczenia, na poziomie 285 m³/h, w okresie letnim dodatkowo ograniczający temperaturę w pomieszczeniu do maksymalnego poziomu 26°C. System załącza się w godzinach, w których w pomieszczeniu przebywają ludzie. W pozostałych godzinach przyjęto, iż występuje tylko infiltracja powietrza przez nieszczelności budynku, na poziomie ACH = 0,5 1/h. W obu przypadkach temperatura w okresie od 1.09.2022 r. do 31.05.2023 r. utrzymywana jest przez system grzewczy na poziomie 20°C.

Wyniki i dyskusja

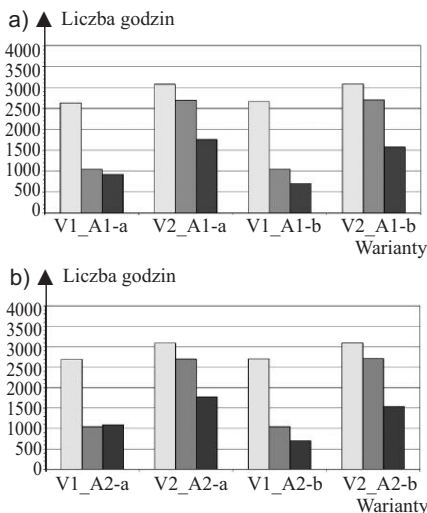
Ocenie poddano wpływ systemu wentylacji w połączeniu z zastosowanym wykończeniem powierzchni wewnętrznych na efekt utrzymania komfortu cieplnego w pomieszczeniu. Efekt ten oceniono przez zmienność liczby godzin, w przypadku których w pomieszczeniu w godzinach 6.00 – 17.00, w dni robocze od poniedziałku do piątku (3132 godziny) parametry jakości powietrza były w zakresie parametrów akceptowalnych, założonych na poziomie:

- w przypadku temperatury 20 – 26°C;
- w przypadku wilgotności względnej powietrza 40 – 60%;
- w przypadku stężenia dwutlenku węgla poziom stężenia nie wyższy niż 1500 ppm.

Ocena dotyczyła następujących wariantów wykończenia powierzchni wewnętrznych przegród budowlanych:

- A1-a – płyta gipsowo-kartonowa bez malowania;
- A1-b – płyta gipsowo-kartonowa z malowaniem;
- A2-a – tynk cementowo-wapienny bez malowania;
- A2-b – tynk cementowo-wapienny z malowaniem.

Rysunek 1 przedstawia liczbę godzin komfortu cieplnego w odniesieniu do temperatury, wilgotności i stężenia dwutlenku węgla CO₂ w przypadku wszystkich analizowanych wariantów.



Oznaczenia: ■ t – temperatura; ■ CO₂ – stężenie dwutlenku węgla; ■ RH – wilgotność względna

Rys. 1. Liczba godzin komfortu cieplnego w odniesieniu do temperatury, wilgotności i CO₂ w przypadku materiału: a) A1 (płyta gipsowo-kartonowa); b) A2 (tynk cementowo-wapienny) – warianty z malowaniem powierzchni wewnętrznych przegród budowlanych (-b) i bez malowania (-a), w zależności od systemu wentylacyjnego V1 i V2
 Fig. 1. The number of comfort hours for temperature, relative humidity and CO₂ for materials: a) A1 (gypsum board); b) A2 (cement-lime plaster) with paint internal surfaces of building partitions (-b) and no paint (-a), depending on the ventilation system V1 and V2

W scenariuszu V1 (wentylacja grawitacyjna) liczba godzin komfortu w przypadku temperatury w pomieszczeniu we wszystkich analizowanych wariantach materiałowych utrzymuje się na porównywalnym poziomie ok. 2672 h, co stanowi 85% h z 3132 h użytkowania pomieszczenia. Z kolei przy kontrolowanym strumieniu powietrza nawiewanego, wynikającym z założonego maksymalnie dopuszczalnego poziomu stężenia CO₂ (scenariusz V2), liczba godzin komfortu wynosi średnio 3087 h, co stanowi 95% h. Większa liczba godzin komfortu w przypadku systemu DCV wynika z przyjętego sposobu sterowania, co wpływa na obniżenie temperatury w pomieszczeniu w okresie letnim. Nie dochodzi wówczas do znacznego przegrzania pomieszczenia, co niestety jest nieuniknione w przypadku wentylacji grawitacyjnej.

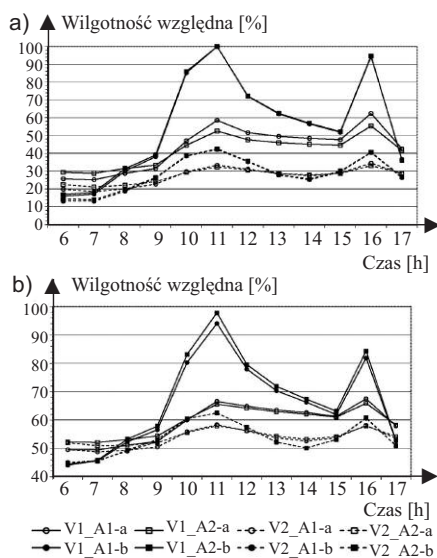
Największa różnica pomiędzy scenariuszami V1 (wentylacja grawitacyjna) i V2 (wentylacja z priorytetem sterowania stężeniem CO₂) pod względem liczby godzin komfortu cieplnego w okresie

użytkowania pomieszczenia (3132 h) zauważalna jest w odniesieniu do stężenia CO₂. W przypadku scenariusza V1 dla wszystkich analizowanych rozwiązań materiałowych liczba godzin komfortu wynosi 1044 h, co stanowi 33,3% h. Z kolei w przypadku scenariusza V2 liczba godzin komfortu wynosi 2704, co stanowi 86,3% h. Jest to oczywiste, ze względu na przyjęty sposób sterowania systemem wentylacji.

W odniesieniu do zmienności wilgotności względnej w pomieszczeniu w przypadku scenariusza V2 i płyty gipsowo-kartonowej bez pomalowania (V2_A1-a), liczba godzin komfortu cieplnego wynosi 1757, a w przypadku tynku cementowo-wapiennego również bez pomalowania (V2_A2-a) – 1771 h, natomiast w wariantach z pomalowaniem: V2_A1-b – 1576 h, a V2_A2-b – 1542 h. Przy scenariuszu V1 można zauważyć pogorszenie jakości powietrza w odniesieniu do wilgotności względnej, co oznacza mniejszą liczbę godzin komfortu w okresie użytkowania pomieszczenia w porównaniu z wariantem V2. Analizując scenariusz V1, widzimy, że w przypadku materiału A1 bez pomalowania (V1_A1-a) liczba godzin komfortu wynosi 924, a materiału A2 również bez pomalowania (V1_A2-a) – 1090 h, natomiast w przypadku wariantu z pomalowaniem mamy odpowiednio: V1_A1-b – 704 h; V1_A2-b – 703 h. Porównując pomalowane i niepomalowane powierzchnie ścian, zarówno w przypadku materiału A1, jak i A2 większa jest liczba godzin komfortu wariantów niepomalowanych. Na opisane różnice wpływ miały różne właściwości higroskopijne materiałów A1 i A2, przekładające się na zdolność do buforowania wilgoci. Zastosowanie materiału A2 charakteryzującego się większą wartością buforowania wilgoci, pozwala na skrócenie czasu przebywania użytkowników w warunkach ekstremalnych. Z kolei, pomalowanie powierzchni wewnętrznych farbą o dodatkowym oporze dyfuzyjnym znacznie ogranicza zdolność do buforowania poszczególnych materiałów, co przekłada się na większą różnicę w odniesieniu do amplitudy wilgotności względnej w pomieszczeniu. Podobne wyniki uzyskali Latif i in. [19] oraz Shang i Tariku [20].

Niezależnie od zastosowanego materiału wykończeniowego przy realizacji scenariusza V1 stwierdzono pogorszenie jakości powietrza w odniesieniu do wilgotności względnej, co oznacza mniejszą liczbę godzin komfortu w okresie użytkowania pomieszczenia w porównaniu ze scenariuszem V2. W przypadku wentylacji grawitacyjnej założono kilkakrotne przewietrzanie sali. Po otwarciu okna w okresie letnim napływa do pomieszczenia ciepłe i wilgotne powietrze, natomiast w okresie zimowym powietrze suche, które po podgrzaniu zwiększa swoją wilgotność. Wzrost tej wilgotności jest przejmowany przez materiały higroskopijne, które pochłaniając wilgoć, obniżają jednocześnie wilgotność w pomieszczeniu. W przypadku scenariusza V2, w którym założony został priorytet sterowania CO₂ z chłodzeniem wentylacyjnym, nie mamy do czynienia z wyraźnymi pikami wzrostu wilgotności względnej w pomieszczeniu, dlatego też różnica pomiędzy materiałami pomalowanymi i niepomalowanymi jest zdecydowanie mniejsza. Widać to na rysunku 2, przedstawiającym dobową zmienność wilgotności względnej w wybranym dniu z okresu letniego (5 lipca 2023 r.) i zimowego (7 grudnia 2022 r.).

Porównując zmianę wilgotności względnej w pomieszczeniu w zależności od rodzaju systemu wentylacyjnego



Rys. 2. Zmiana wilgotności względnej w pomieszczeniu: a) 7 grudnia 2022 r.; b) 5 lipca 2023 r.

Fig. 2. The indoor relative humidity change on: a) 7 December 2022; b) 5 July 2023

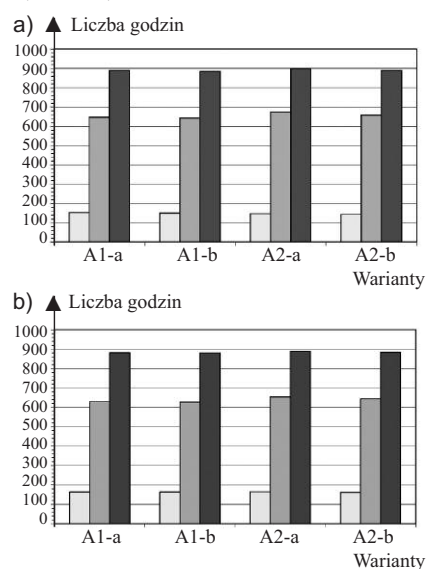
oraz zastosowanego materiału wykończenia powierzchni wewnętrznych przegród budowlanych, stwierdzono, że amplituda jej zmian w przypadku powierzchni niepomalowanych (-a) jest mniejsza w porównaniu z pomalowanymi (-b). Najmniejszą amplitudę zmian wilgotności względnej odnotowuje się przy systemie DCV (scenariusz V2) w przypadku powierzchni niepomalowanych, przy czym dla materiału A2 wynosi ona 7% RH, a A1 odpowiednio 9% RH. Z kolei w przypadku powierzchni pomalowanych amplituda ta wynosi 17% RH, niezależnie od rodzaju materiału. Przy wentylacji grawitacyjnej (scenariusz V1) różnice pomiędzy powierzchniami pomalowanymi i niepomalowanymi są jeszcze bardziej widoczne. W przypadku niepomalowanych amplituda ta wynosi: materiału A2 – 14% RH, a A1 – 18% RH, w przypadku pomalowanych nie ma różnicy w wartości amplitudy pomiędzy materiałem A1 a A2 i każdorazowo wynosi ona 50% RH. Potwierdza to fakt, iż pomalowanie farbą materiałów higroskopijnych ogranicza ich właściwość higroskopijne.

W związku z tym, że systemy wentylacji mechanicznej DCV są w stanie zapewnić lepsze parametry temperatury, wilgotności względnej oraz stężenia CO₂, w przypadku wentylacji mechanicznej DCV – scenariusz V2 zaproponowano dodatkową ocenę warunków komfortu cieplnego w odniesieniu do literowej klasyfikacji pomieszczeń przedstawionej w normie PN-EN ISO 7730 [21]. W normie tej środowisku wewnętrznemu przypisywane są kategorie literowe A, B, C, zależnie od wartości parametrów komfortu cieplnego PMV (ang. *Predicted Mean Vote*) i PPD (ang. *Predicted Percentage of Dissatisfied*):

- kategoria A – najwyższe wymagania, ze względu na obecność w pomieszczeniach użytkowników szczególnie wrażliwych, np. dzieci, wskaźnik PMV w granicach $<-0,2; +0,2>$, a PPD $<6\%$;
- kategoria B – wymagania normalne stawiane pomieszczeniom w nowo oddawanych budynkach i budynkach modernizowanych, o innych funkcjach niż wymienione w kategorii A, wskaźnik PMV w granicach $<-0,5; +0,5>$, a PPD $<10\%$;

- kategoria C – warunki na średnim, ale jeszcze akceptowalnym poziomie; kategoria może być przyjmowana w istniejących budynkach, wskaźnik PMV w granicach $<-0,7; +0,7>$, a PPD $<15\%$.

Ze względu na analizowanie zachowania materiałów buforujących wilgoć na rysunku 3 przedstawiono liczbę godzin, w których wskaźniki PPD oraz PMV, w odniesieniu do analizowanego wykończenia powierzchni wewnętrznych, odpowiadają wymaganiom dotyczącym danej kategorii pomieszczenia (A, B, C).



Oznaczenia: ■ A; ■ B; ■ C

Rys. 3. Liczba godzin komfortu w odniesieniu do wymagań stawianych danej kategorii budynków wg PN-EN 7730 [21] w odniesieniu do wskaźników: a) PMV; b) PPD
Fig. 3. Number of comfort hours in relation to the requirements set for a given category of buildings according to PN-EN 7730 [21] in relation to indicators: a) PMV; b) PPD

Z przedstawionego porównania widać, że liczba godzin komfortu w odniesieniu do odczuć użytkowników wyrażonych wskaźnikiem PMV, w przypadku poszczególnych kategorii, we wszystkich analizowanych rozwiązaniach materiałowych wykończenia powierzchni wewnętrznych jest do siebie zbliżona. Minimalna, zauważalna różnica występuje jedynie pomiędzy materiałami A1 i A2 przy kategorii B i C. W odniesieniu do kategorii B, przy zastosowaniu materiału A2, liczba godzin komfortu zwiększyła się o 4,2% w przypadku powierzchni niepomalowanych i o 2,5% – powierzchni pomalowanych w porównaniu z materiałem A1. Natomiast w odniesie-

niu do kategorii C, przy zastosowaniu materiału A2 liczba godzin komfortu zwiększyła się o 1,0% powierzchni niepomalowanych i o 0,5% powierzchni pomalowanych w porównaniu z materiałem A1. Podobna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do wskaźnika PPD, liczba godzin, dla których przewidywany odsetek niezadowolonych nieznacznie wzrasta w kategorii B i C. Przy czym dla kategorii B przy zastosowaniu materiału A2, o 3,8% przy materiale niepomalowanym i o 2,7% przy materiale pomalowanym, a dla kategorii C odpowiednio o 0,9% i 0,3%. Wynika z tego, że zastosowanie odpowiedniego materiału wykończeniowego może przyczynić się do poprawy jakości powietrza w pomieszczeniu.

Wnioski

W artykule opisano ocenę wybranych parametrów komfortu środowiskowego (temperatura, wilgotność względna, stężenie ditlenku węgla) w pomieszczeniu żłobka. Porównano działanie systemu DCV sterowanego z priorytetem stężenia CO₂, z systemem wentylacji grawitacyjnej z wykorzystaniem w pomieszczeniu różnych materiałów wykończeniowych powierzchni wewnętrznych. Odpowiednie zastosowanie materiałów buforujących wilgoć może wpływać na zmniejszenie amplitudy zmian wilgotności powietrza w pomieszczeniu zarówno w okresie letnim, jak i zimowym. Materiały te ograniczają dobowe wahania wilgotności względnej w pomieszczeniu, utrzymując ją na stabilnym poziomie w przedziałach akceptowalnych dla użytkownika pomieszczenia. Ich zastosowanie ogranicza czas przebywania użytkowników w warunkach o wilgotności względnej powyżej 60%. Należy jednak pamiętać, iż zastosowanie dodatkowej warstwy wykończeniowej o znacznym oporze dyfuzyjnym, np. farby, ogranicza ten efekt. Niezależnie od przyjętego scenariusza wentylacyjnego materiały buforujące wpływają na obniżenie wilgotności w pomieszczeniu, ale efekt ten jest mniej zauważalny w pomieszczeniach wentylowanych w sposób mechaniczny. Wynika to z faktu, że zastosowanie wentylacji z kontrolowanym strumieniem powietrza nawiewanego w sposób nadążny

ogranicza występujący niekontrolowany, gwałtowny wzrost wilgotności powietrza w pomieszczeniu.

Materiał wykończeniowy powierzchni ścian nie wpływa na liczbę godzin komfortu w odniesieniu do temperatury wewnętrznej. W przypadku scenariusza V2 liczba godzin komfortu zwiększa się tylko o 10% w porównaniu ze scenariuszem V1, do poziomu 95%, na co wpływ ma jedynie założony sposób sterowania.

W pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt małych dzieci (kategoria A), liczba godzin komfortu wyrażona wskaźnikiem PMV i PPD, we wszystkich analizowanych rozwiązaniach materiałowych wykończenia powierzchni wewnętrznych jest do siebie zbliżona w przypadku wentylacji mechanicznej DCV w priorytecie CO₂.

Wyniki z przeprowadzonych symulacji potwierdziły, że niezależnie od sposobu działania wentylacji zastosowanie materiałów buforujących wilgoć zwiększa czas przebywania użytkowników w akceptowalnych parametrach środowiskowych.

Literatura

- [1] Zhuang C, Shan K, Wang S. Coordinated demand-controlled ventilation strategy for energy-efficient operation in multi-zone cleanroom air-conditioning systems. *Build Environ.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107588>.
- [2] Guyot G, Sherman MH, Walker IS. Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review. *Energy Build.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.051>.
- [3] Simonson CJ, Salonvaara M, Ojanen T. The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality. *Indoor Air.* 2002; <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.01128.x>.
- [4] Teodosiu C, Hohota R, Rusaouen G, Woloszyn M. Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment. *Build. Environ.* 2003; [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00211-1).
- [5] Künzel HM, Holm A, Zirkelbach D, Karagiozis AN. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Sol. Energy.* 2005; <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.002>.
- [6] Kaczorek D, Pietruszka B. Buforowanie wilgoci przez innowacyjne przegrody wewnętrzne. *Materiały Budowlane.* 2017; <https://doi.org/10.15199/33.2017.08.10>.
- [7] Woloszyn M, Kalamees T, Abadie MO, Steeman M, Kalagasidis AS. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system

with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. *Build. Environ.* 2009; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.017>.

- [8] WUFI Plus V 3.2.0.1: Fraunhofer Institute for Building Physics.
- [9] Künzel HM. Simultaneous heat and moisture transport in building components – One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD thesis. Fraunhofer Institute of Building Physics. Stuttgart. Germany; 1995.
- [10] PN-EN 15026:2008 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe komponentów budowlanych i elementów budynku – Szacowanie przenoszenia wilgoci za pomocą symulacji komputerowej.
- [11] Künzel HM, Holm A, Zirkelbach D. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Sol. Energy.* 2005; <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.002>.
- [12] Coelho GBA, Entradas Silva H, Henriques FMA. Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings. *Build. Environ.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.034>.
- [13] Kaczorek D, Basińska M, Koczyk H. Hygrothermal behaviour of a room with different occupancy scenarios. *J. Build. Eng.* 2023; <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105928>.
- [14] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc., Atlanta, GA, USA; 2004.
- [15] IEA Annex 41. Whole building heat, air, moisture response; <https://research.tuni.fi/building-physics/international-collaboration/annex-41/> (dostęp 9 stycznia 2024).
- [16] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 62.2 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in residential buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA; 2022.
- [17] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z 10 lipca 2014 r. w sprawie wymagań lokalowych i sanitarnych, jakie musi spełniać lokal, w którym ma być prowadzony żłobek lub klub dziecięcy (DzU 2014, poz. 925).
- [18] DIN 1946-2 Ventilation and air conditioning. Technical health requirements (VDI ventilation rules); 2008.
- [19] Latif E, Lawrence M, Shea A, Walker P. Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Build. Environ.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>.
- [20] Shang Y, Tariku F. Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering. *Build. Environ.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108377>.
- [21] PN-EN ISO 7730:2006: Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego.

Przyjęto do druku: 20.03.2024 r.