

dr hab. inż. Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-8515-218X

dr hab. inż. Andrzej Gajewski<sup>2)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-2930-4425

dr inż. Piotr Wichowski<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-9852-7884

# Jakość powietrza w Centrum Nowoczesnego Kształcenia

## *Air quality in a Modern Education Center*

DOI: 10.15199/33.2024.03.08

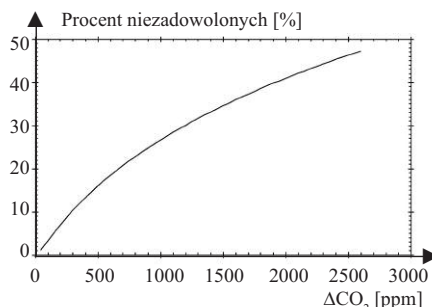
**Streszczenie.** Badania prowadzono w nowoczesnym, nowo wybudowanym obiekcie. Pomiar jakości powietrza wewnętrznego wykonano na różnej wysokości w holu głównym. Ich celem było wyznaczenie rozkładu temperatury, wilgotności względnej i stężenia CO<sub>2</sub> w przekroju pionowym, a następnie porównanie z wartościami dopuszczalnymi. Maksymalna wartość stężenia CO<sub>2</sub> zmierzona zgodnie z normą w dolnej części holu wynosi 735 ppm, a maksymalna wilgotność względna w tej samej części holu 28,6% jest poniżej wartości wymaganych w obowiązującym rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych. Wykonano obliczenia symulacyjne, jak zastosowanie recyrkulacji, przy założeniu nieprzekroczenia stężenia CO<sub>2</sub> powyżej 1000 ppm w strefie przebywania ludzi, wpłynęłoby na zwiększenie wilgotności względnej. Zalecane jest miejscowe nawilżenie holu lub powietrza nawiewanego w centralach wentylacyjnych.

**Słowa kluczowe:** wilgotność względna; stężenie CO<sub>2</sub>; nowoczesne budownictwo; wentylacja.

**Abstract.** The measurements were done in a modern newly-constructed building. IAQ measurements were done at different height in the main hall; their main goal was determining the profiles of temperature, relative humidity, and CO<sub>2</sub> concentration along the vertical cross section, and then the comparison of these values with the allowable values ranges. CO<sub>2</sub> concentration is in accordance with applicable standards; its maximum is 735 ppm at the lower part of the hall. At the same part it was also measured the maximal relative humidity of 28.6% which is lower than the value recommended by the standards. There were made simulative calculations how an applied recirculation, on the assumption that CO<sub>2</sub> concentration does not exceed 1000 ppm in the people's residence zone, increased the relative humidity. There is recommended humidifying the hall locally or supplied air in an air handler.

**Keywords:** relative humidity; CO<sub>2</sub> concentration; modern construction industry; ventilation.

Dopuszczalny maksymalny udział molowy (zwany dalej stężeniem) dwutlenku węgla w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie przebywają w sposób ciągły ludzie, wynosi 1000 ppm. Jest to minimum higieniczne zalecane przez normę [1]. Wytyczne Komisji Wspólnot Europejskich [2] podają zależność procentu osób niezadowolonych w funkcji nadwyżki stężenia CO<sub>2</sub> wewnątrz pomieszczenia ponad stężenie zewnętrzne wyrażone w liczbie mikromoli CO<sub>2</sub> w odniesieniu do jednego mola powietrza (wg definicji ppm podanej przez International Union of Pure and Applied Chemistry [3]). Zależność tę przedstawiono na rysunku 1. Co czwarta osoba będzie niezadowolona z jakości powietrza, jeżeli stężenie wewnątrz pomieszczenia będzie większe o 908 ppm od zewnętrznego; połowa osób natomiast wyrazi niezadowolenie, gdy ta nadwyżka wyniesie 2887 ppm.



**Rys. 1. Procent osób niezadowolonych w zależności od nadwyżki stężenia CO<sub>2</sub> ponad stężenie zewnętrzne**

*Fig. 1. The plot of the percentage of the dissatisfied persons in dependence on the excessive CO<sub>2</sub> concentration above the external concentration*

**Nadwyżka stężenia CO<sub>2</sub>** jest jednym z dwóch parametrów służących do określenia indeksu jakości powietrza wewnętrznego IAQ<sub>index</sub>, który jest jedną z czterech zmiennych służących do wyznaczenia wskaźnika jakości środowiska wewnętrznego IEQ [4].

**Wpływ wilgotności** na jakość powietrza wewnętrznego może być bezpośredni lub pośredni [2]. Duża wilgotność względna, kondensacja lub wnikanie pa-

ry wodnej pobudza wzrost pleśni lub innych grzybów, co może wywoływać alergię lub nieprzyjemne zapachy. Zwiększona wilgotność może też wzmacniać emisję np. formaldehydu z materiałów budowlanych, wykończeniowych lub mebli, a także prowadzić do zawilgocenia materiałów, płyt poszycia, a nawet korozji elementów konstrukcyjnych [6]. Z kolei zbyt mała wilgotność wywołuje odczucie suchości, podrażnienie skóry lub błon śluzowych u osób przebywających w pomieszczeniach. Wartość wilgotności względnej jest wynikiem emisji lub ruchów konwekcyjnych oraz procesów sorpcji i desorpcji wilgoci na elementach wyposażenia. Udział tych czynników wynosi odpowiednio 80% w przypadku emisji lub konwekcji i 20% – sorpcji lub desorpcji [6].

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu podzielone przez ciśnienie nasycenia pary wodnej jest **wilgotnością względną**, która służy do wyznaczenia **indeksu komfortu cieplnego TC<sub>index</sub>**, będącego drugą składową do obliczenia indeksu IEQ [4]. W zależności od aktywności fizycznej, za opty-

<sup>1)</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

<sup>2)</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: a.gajewski@pb.edu.pl

malne uznano warunki w pomieszczeniach, określone przez następujące parametry powietrza [7, 8] zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem Ministra Rozwoju i Technologii [9]:

- przy małej aktywności: temperatura powietrza zimą 20 – 22°C; latem 23 – 26°C; wilgotność względna latem 40 – 55%; zimą 40 – 60%,

- przy średniej aktywności: temperatura powietrza zimą 18 – 20°C; latem 20 – 23°C; wilgotność względna 40 – 60%;

- przy dużej aktywności: temperatura powietrza zimą 15 – 18°C; latem 18 – 21°C; wilgotność względna 40 – 60%.

Komfort termiczny jest również istotnym parametrem wpływającym na jakość środowiska wewnętrznego [4, 10]. Nadmierne przegrzewanie powietrza latem skutkuje obniżeniem wydajności pracy, a jego chłodzenie generuje dodatkowe koszty [11, 12].

Przeprowadzone przez nas badania stanowią rozwinięcie badań wcześniej prowadzonych w innym rodzaju budynków użyteczności publicznej [13, 14, 15].

## Charakterystyka budynku

Badania przeprowadzono w budynku, w którym mieści się Centrum Nowoczesnego Kształcenia (CNK) – fotografie 1 i 2. Jest to budynek czterokondygnacyjny o powierzchni użytkowej 8 067,4 m<sup>2</sup> (powierzchnia całkowita 9 127 m<sup>2</sup>) o kubaturze całkowitej 48 013 m<sup>3</sup>. Został zbudowany w konstrukcji żelbetowej z jednoprzestrzennym holem o wysokości 14 m z antresolą i sąsiadującymi z nim częściami kilkukondygnacyjnymi. Budynek CNK (fotografia 1) tworzą trzy wydzielone strefy funkcjonalne: dwa bloki skrzydeł budynku mieszczące bibliotekę i Studium Języków Obcych oraz Centrum Kształcenia Zdalnego, a także łącznik mieszczący strefę wejściową wraz z boksem czytelnia. Kondygnacje przyziemia mieszczą magazyny, zespoły opracowania druków, strefę wejścia dla pracowników i dostawy książek oraz pomieszczenia techniczne budynku.

Na parterze CNK znajduje się wejście dla użytkowników z poziomu placu, które prowadzi do łącznika biblioteki (hol wejściowy, stanowisko informacji wstępnej, szatnie i pomieszczenie portiera).



Fot. 1. Centrum Nowoczesnego Kształcenia – skrzydło północne i hol

Fot. K. Gładyszewska-Fiedoruk

Photo 1. Centre for Modern Education – the north wing of the building and entrance hall

Photo K. Gładyszewska-Fiedoruk



Fot. 2. Hol Centrum Nowoczesnego Kształcenia

Photo 2. The entrance hall in the Centre for Modern Education



Fot. A. Gajewski

Photo A. Gajewski

Część skrzydła południowego mieści zespół czytelnia; pomieszczenia informacji oraz wypożyczalnię. W części północnej znajdują się pomieszczenia strefy ogólnodostępnej: sala konferencyjna z foyer i bufet. Zaplecze bufetu zlokalizowano w strefie technicznej skrzydła północnego. Dodatkowo mieści się tu księgarnia, kiosk, pomieszczenia administratora i serwerownia.

Na pierwszym piętrze w południowym skrzydle znajdują się: czytelnia z wolnym dostępem do półek; przestrze-

nie biblioteczny dziedzinowy i sortownia. Boksy łącznika mieszczą w sobie sale do pracy indywidualnej i zbiorowej czytelnia. W skrzydle północnym znajdują się sale ćwiczeń, laboratoria komputerowe, gabinety lektorów, a także pracownie i studia Centrum Kształcenia Zdalnego.

Na drugim piętrze skrzydło północne stanowią pomieszczenia dydaktyczne Studium Języków Obcych, natomiast skrzydło południowe – administracja i biura biblioteki z zapleczem socjalnym

i pokojami gościnnymi. Łącznik mieści dodatkowo strefę społeczną biblioteki – czytelní (fotografia 3). Strefa jest otwarta do przestrzeni holu i ma połączenie z tarasem biblioteki. W pobliżu tej strefy zlokalizowano sale do pracy zbiorowej i multimedialną salę dydaktyczną.



Fot. 3. Strefa społeczna biblioteki

Fot. A. Gajewski

Photo 3. Social area of the library

Photo A. Gajewski

## Opis instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej

W holu zainstalowano układ wentylacji nawiewno-wywiewnej z chłodzeniem powietrza. Wentylacja realizowa-

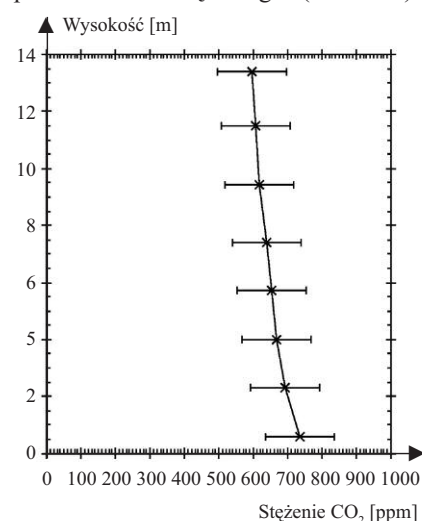
na jest centralą wentylacyjną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła, z komorą mieszania, z nagrzewnicą wodną o parametrach 70/50°C i chłodnicą freonową. Rozprowadzenie powietrza świeżego realizowane jest kratkami dalekiego zasięgu montowanymi na kanałach prowadzonych pod stropem na poziomie „+1” (przestrzeń pustki powietrznej nad parterem). Jest to ok. 0,5 m powyżej 6. punktu pomiarowego, licząc od dołu wykresu (rysunki 2 i 3). Wywiew realizowany jest kratkami wywiewnymi usytuowanymi pod stropem kondygnacji „0” i na wysokości 4. punktu pomiarowego. W łączniku nawiew powietrza odbywa się anemostatami nawiewnymi ze skrzynkami rozprężnymi, a usuwanie zanieczyszczonego powietrza przez wywiewniki również ze skrzynkami rozprężnymi. Kanały wentylacyjne nawiewne i wywiewne wewnątrz pomieszczeń o przekroju prostokątnym, ze względów akustycznych wykonano z płyt, a kanały okrągłe z blachy stalowej typu Spiro i obudowano wełną mineralną pod płaszczem z folii aluminiowej.

Wentylację i klimatyzację w czytelní czasopism, czytelní zbiorów specjalnych, wypożyczalni międzybibliotecznej przyjęto jako nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła. Wydajność centrali zapewnia dopływ świeżego powietrza na osobę 30 m<sup>3</sup>/h (7 wymian) w każdym pomieszczeniu. Przewody wentylacyjne prowadzone są w przestrzeni stropu podwieszanego. Nawiew powietrza odbywa się anemostatami ze skrzynkami rozprężnymi, a wywiew – anemostatami wywiewnymi oraz zaworami. Dodatkowe zyski ciepła w pomieszczeniach odbierane są przez system klimatyzatorów kasetonowych z bezpośrednim odparowaniem, pracujących w systemie VRF. Wszystkie centrale wentylacyjne wyposażone są w automatykę sterującą:

- temperaturą nawiewu przez regulację mocy grzewczej nagrzewnicy i chłodnicy;
- zabezpieczeniem nagrzewnicy wodnej przed zamarznięciem;
- sygnalizacją zabrudzenia filtrów, awarii wentylatora, pracy instalacji oraz odzysku ciepła.

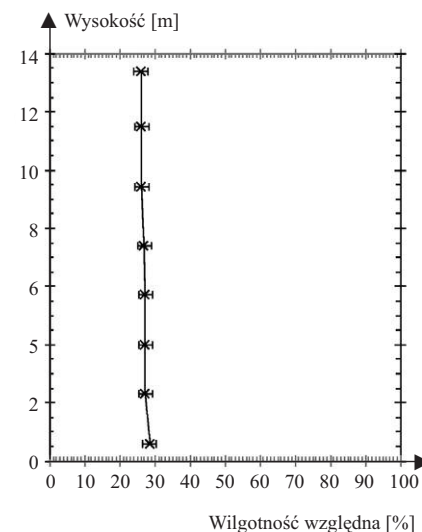
## Opis badań, wyniki i dyskusja

Pomiary wykonywano w holu wejściowym w lutym 2015 r. Badania jakości powietrza zostały przeprowadzone w różnych punktach na wysokości budynku (rysunki 2 i 3) za pomocą miernika testo435-4 z sondą do pomiaru jakości powietrza z dokładnością: temperatura 0 ÷ +50°C ±0,3°C; wilgotność względna 2 ÷ 98% ±2%; stężenie dwutlenku węgla 0 ÷ 5000 ppm CO<sub>2</sub> ±50 ppm CO<sub>2</sub> ±3%; ciśnienie atmosferyczne 600 ÷ 1150 hPa ±5 hPa. Jednocześnie monitorowano parametry powietrza zewnętrznego (tabela 1).



Rys. 2. Wyniki pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> na różnej wysokości budynku

Fig. 2. The measurement results of CO<sub>2</sub> concentration at the different building heights



Rys. 3. Wyniki pomiarów wilgotności względnej na różnej wysokości budynku

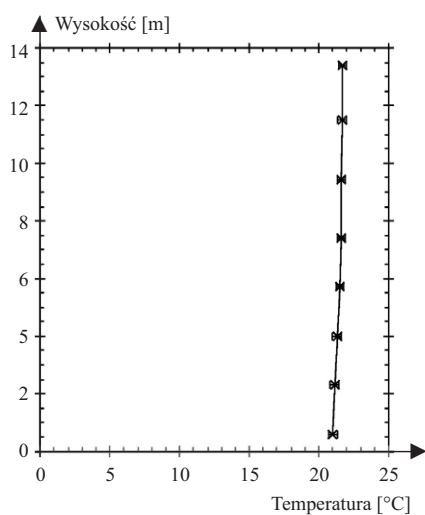
Fig. 3. The measurement results of the relative humidity at the different building heights

Na rysunkach 2, 3 i 4 zostały zamieszczone słupki estymowanych wartości niepewności pomiarowych wyznaczone w przedziale ufności  $2\sigma$  (poziom istotności 5%). Wyniki pomiarów wszystkich badanych parametrów aproksymowano równaniami z określeniem współczynnika determinacji (tabela 2). W tabeli 1 zamieszczono wartości parametrów powietrza zewnętrznego, przy których były wykonane badania.

**Tabela 1. Parametry powietrza zewnętrznego**

Table 1. The parameters of the outdoor air

Parametr	Luty 2015 r.
Stężenie CO <sub>2</sub> [ppm]	404
Temperatura [°C]	+1
Wilgotność [%]	86
Ciśnienie [hPa]	1000



**Rys. 4. Wyniki pomiarów temperatury powietrza na różnej wysokości budynku**

Fig. 4. The measurement results of the temperature at the different building heights

**Tabela 2. Równania aproksymujące wyniki pomiarów parametrów powietrza wewnętrznego (opracowanie własne na podstawie wyników pomiarów)**

Table 2. The equations approximating the measurement outcomes of the outdoor air (the own study on the basis of measurement results)

Mierzony parametr	Równanie aproksymujące	Współczynnik determinacji
Stężenie CO <sub>2</sub> [ppm]	$y = 0,0006x^2 - 0,8591x + 319,86$	$R^2 = 0,9913$
Wilgotność względna [%]	$y = 1,6816x^2 - 96,795x + 1392,9$	$R^2 = 0,9376$
Temperatura [°C]	$y = 198,31x^4 - 16835x^3 + 535900x^2 - 8E + 06x + 4E + 07$	$R^2 = 0,9833$

**Stężenie CO<sub>2</sub>** ma wartości zgodne z normą [16] i wytycznymi [17]. Maksymalna zmierzona wartość stężenia CO<sub>2</sub> wynosi 735 ppm (rysunek 2). W niektórych częściach Polski (np. Po-

morze) powietrze zewnętrzne ma takie wartości stężenia CO<sub>2</sub>. Stężenie dwutlenku węgla jest niemal stałe powyżej poziomu krtek nawiewnych i ok. 1,5 raza większe od stężenia w powietrzu zewnętrznym. Wzrasta ono w dolnych partiach budynku, co jest zgodne z naturalną stratyfikacją, gdyż jest to gaz cięższy od powietrza. Wartość **wilgotności względnej** jest natomiast poniżej wartości wymaganych w rozporządzeniu [9] lub zalecanych w normach i wytycznych [16, 17]. Największa wartość – 28,6% jest w dolnej części budynku. Jest to wpływ przedostawania się powietrza zewnętrznego o dużej wilgotności względnej w dniu pomiarów (tabela 1) i jednocześnie małej wilgotności właściwej 3,5 g/kg przez szerokie drzwi wejściowe, co sprawia, że powietrze wewnątrz budynku jest suche po ogrzaniu. Wilgotność względna zmniejsza się do drugiego punktu pomiarowego, licząc od dołu, a następnie jest stała aż do poziomu krtek wyciągowych. Następnie dalej maleje w miarę zbliżania się do krtek nawiewnych dalekiego zasięgu (rysunek 3). Powyżej poziomu nawiewu jej wartość, analogicznie do stężenia CO<sub>2</sub>, zmniejsza się nieznacznie wraz z wysokością.

**Temperatura powietrza** jest zgodna z normą [16] i wynosi 21 – 21,7°C (rysunek 4). Pomimo dobrego mieszania można zaobserwować niewielką stratyfikację powietrza. Do wysokości wnętrza budynku wynoszącej ok. 7 m następuje dosyć duży wzrost temperatury powietrza. Od wspomnianej wysokości można zaobserwować niewielki wzrost temperatury. Na podstawie analizy rysunku 4 stwierdzono, że duży wzrost

temperatury występuje na wysokości 7 m i wynosi 0,5°C. Na całej wysokości budynku (14 m) wzrost temperatury, w stosunku do temperatury na parterze, to 0,7°C.

Z największą dokładnością aproksymowano wyniki pomiarów stężenia dwutlenku węgla. Krzywa – wielomian drugiego stopnia bardzo dokładnie oddaje charakter uzyskanych wyników eksperymentu. Najtrudniejsze było opisanie temperatury powietrza wewnętrznego. Wielomian czwartego stopnia niezbyt dokładnie oddaje krzywą otrzymaną z wyników pomiarów. Wprowadzając najmniejszy współczynnik determinacji odnotowano przy aproksymacji wilgotności względnej, niemniej wielomian drugiego stopnia wystarczająco dobrze odnosił się do uzyskanych wyników pomiarów. Opisanie tych danych wielomianem wyższego stopnia nie wpływało na zwiększenie dokładności opisu (zmiana współczynnika determinacji na czwartym miejscu po przecinku).

**Symulacja zwiększenia wilgotności przy recyrkulacji.** Ze względu na zbyt małą wilgotność względną przeprowadzono obliczenia symulacyjne, jak wpłynęłoby zastosowanie recyrkulacji przy założeniu, że nie zostanie przekroczony poziom 1000 ppm CO<sub>2</sub> w strefie przebywania ludzi, który wg pomiarów wynosi 734,8 ppm. Biorąc pod uwagę, że średnie stężenie CO<sub>2</sub> wynosi 650,575 ppm, to w przypadku proporcjonalnego wzrostu wyniosłoby ono 885,377 ppm. Krotność recyrkulacji  $k$  obliczono wg wzoru (1):

$$k = \frac{C_r - C_u}{C_r - C_z} \quad [-] \quad (1)$$

gdzie:

$C_r$  – średnie stężenie CO<sub>2</sub> po zastosowaniu recyrkulacji [ppm];

$C_u$  – średnie stężenie CO<sub>2</sub> z pomiarów [ppm];

$C_z$  – stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu zewnętrznym [ppm].

W wyniku obliczeń otrzymano

$$k = \frac{885,377 - 650,575}{885,377 - 404} = 0,48777 \quad (2)$$

Wilgotność względna w strefie przebywania ludzi zostanie określona po wyznaczeniu wilgotności właściwej z bilansu wilgoci:

$$x_r = \frac{x_u - kx_z}{1 - k} \quad \left[ \frac{g}{kg} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$x_r$  – wilgotność właściwa po zastosowaniu recyrkulacji [g/kg];

$x_u$  – wilgotność właściwa wyznaczona z pomiarów [g/kg];

$x_z$  – wilgotność właściwa powietrza zewnętrznego [g/kg].

Wartość wilgotności właściwej wyznaczono wg [18]:

$$x = 622 \frac{\varphi p_s}{p_a - \varphi p_s} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \quad (4)$$

gdzie:

$\varphi$  – wilgotność względna [-];

$p_a$  – ciśnienie atmosferyczne [kPa];

$p_s$  – ciśnienie nasycenia pary wodnej [kPa].

Podstawiając do równania (3), otrzymano wilgotność właściwą po zastosowaniu recyrkulacji:

$$x_r = \frac{4,21528 - 0,48777 \cdot 3,53223}{1 - 0,48777} = 4,86571 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \quad (5)$$

Wilgotność względną po zastosowaniu recyrkulacji  $\varphi_r$  wyznaczono wg [18]:

$$\varphi_r = \frac{p_a}{p_s} \frac{x_r}{622 + x_r} \quad [-] \quad (6)$$

Obliczona wilgotność względna wynosi

$$\varphi_r = \frac{98,33}{2,3858} \frac{4,86571}{622 + 4,86571} = 0,3199 \quad [-] \quad (7)$$

Otrzymana w równaniu (7) wilgotność względna  $\varphi \approx 32\%$  jest poniżej dolnej granicy wartości optymalnych.

## Wnioski

Pomiary jakości powietrza w budynkach wysokich są rzadko prowadzone. Do wyjątku należą badania przeprowadzone w Kanadzie [19], które potwierdzają słusność podziału budynku na strefy do wentylowania. Badany budynek ma dobrze zorganizowaną wymianę powietrza. Jakość powietrza, biorąc pod uwagę stężenie dwutlenku węgla, w hali jest bardzo dobra i zgodna z normą [16], natomiast wilgotność względna jest zbyt mała i nie mieści się w wymaganym [9] lub zalecanym [16, 17] zakresie 40 – 60%.

Należy zadbać o dowilżenie powietrza przez zastosowanie autonomicznych nawilżaczy powietrza lub zwiększyć nawilżanie powietrza w centralach wentylacyjnych, gdyż zastosowanie recyrkulacji nie spowodowałoby uzyskania parametrów optymalnych. Osoby pracujące w CNK mogą uskarżać się na wysuszenie śluzówek oczu, nosa, gardła. Może to skutkować zachorowalnością na infekcje oczu lub górnych dróg oddechowych.

Wyniki badań wskazują na niemal równomierny rozkład temperatury w wysokim pomieszczeniu, gdyż różnica temperatury na wysokości 14 m wynosi niecały 1°C. Analogicznie jest w przypadku rozkładu wilgotności względnej, a nieco inaczej w przypadku CO<sub>2</sub>, którego stężenie zwiększa się w dół pomieszczenia. Przyczyną tej rozbieżności może być gęstość względna, która w przypadku pary wodnej wynosi 0,62, a CO<sub>2</sub> – 1,52.

Na podstawie przeprowadzonych badań należy uznać rozdział powietrza zastosowany w budynku CNK za prawidłowy i zalecić jego stosowanie w nowo projektowanych wysokich budynkach, o niejednorodnym rozmieszczeniu pięter z pomieszczeniami zamkniętymi w sąsiedztwie wysokiej hali, o relatywnie bardzo dużej kubaturze.

W projektowanych instalacjach należy uwzględnić możliwość zmiany ilości powietrza recyrkulowanego, aby można było dokonywać korekty w trakcie eksploatacji na podstawie pomiarów profili temperatury, wilgotności, stężenia dwutlenku węgla lub innych zanieczyszczeń.

## Literatura

- [1] PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, ośw. Polska, 2019, p. 74. [Online]. Available: <https://sklep.pkn.pl/pn-en-16798-1-2019-06p.html>.
- [2] ECA (European Collaborative Action), „Indoor Air Quality & Its Impact on Man – Report No. 11 – Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings,” 1992.
- [3] Schwartz SE, Warneck P. Units for use in atmospheric chemistry (IUPAC Recommendations 1995). Pure Appl. Chem. 1995; DOI: 10.1351/pac-199567081377.
- [4] Piasecki M, Kostryko K. Określanie wskaźnika IEQ jakości środowiska wewnętrznego budynku. Determination of the quality of the internal environment of the building IEQ. Materiały Budowlane. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.12.10.
- [5] Wójcik R, Skotnicka-Siepsiak A, Kosiński P. Wpływ wentylacji na wilgotność hali basenowej – eksperymentalna weryfikacja modelu numerycznego. Materiały Budowlane. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.03.03.
- [6] Mijakowski M. Wymiana pary wodnej pomiędzy materiałami budowlanymi a powietrzem w pomieszczeniu. Materiały Budowlane. 2019; DOI: 10.15199/33.2019.01.05.

[7] Fanger PO, Lauridsen J, Blyussen P, Clausen G. Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit. Energy Build. 1988; DOI: 10.1016/0378-7788 (88) 90052-7.

[8] Fanger PO. Fundamentals of thermal comfort. Adv. Sol. Energy Technol. 1988; DOI: 10.1016/B978-0-08-034315-0.50562-0.

[9] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. 2022.

[10] Bromberek Z. Komfort wewnątrz budynków pasywnych. User's comfort in passive buildings. Materiały Budowlane. 2017; DOI: 10.15199/33.2017.01.13.

[11] Kroner W, Jakubowska P, Noszczyk P. Ochrona pomieszczeń przed przegrzewaniem w okresie letnim w aspekcie komfortu termicznego. Materiały Budowlane. 2019; DOI: 10.15199/33.2019.09.03.

[12] Dybiński O, Mijakowski M. Problemy związane z utrzymaniem komfortu w dużych halach przemysłowych w okresie letnim. Thermal comfort in huge production halls during summer. Materiały Budowlane. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.01.13.

[13] Gładyszewska-Fiedoruk K. Analysis of stack ventilation system effectiveness in an average kindergarten in north-eastern Poland. Energy Build. 2011; DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.001.

[14] Gładyszewska-Fiedoruk K. Analiza stanu środowiska wewnętrznego w wybranych przedszkolach ze szczególnym uwzględnieniem dwutlenku węgla. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja. 2010; vol. R. 41, nr 2: 28 – 30.

[15] Gładyszewska-Fiedoruk K, Gajewski A. Effect of wind on stack ventilation performance. Energy Build. 2012; vol. 51, pp. 242 – 247; DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.05.007.

[16] PN-EN 16798-3:2017-09 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 3: Wentylacja budynków niemieszkalnych – Wymagania dotyczące właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń (Moduł M5-1, M5-4). Polska, 2017, p. 57. Accessed: Sep. 28, 2023. [Online]. Available: <https://sklep.pkn.pl/pn-en-16798-3-2017-09e.html>.

[17] Recknagel H, Sprenger E, Schramek E-R. Kompendium ogrzewnictwa i klimatyzacji: łączenie z zagadnieniami przygotowania ciepłej wody i techniki chłodniczej, Wydanie 3, poprawione. Wrocław: Omni Scala, 2008.

[18] Ferencowicz J. Wentylacja i klimatyzacja, Wydanie 2 poprawione. Warszawa: „Arkady,” 1964.

[19] Lozinsky CH, Touchie MF. Size matters (at least for interior air flow pathways): The indoor air quality and energy implications of compartmentalization in multi-unit residential buildings. Build. Environ., vol. Journal Pr. 2024; DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111275.

*Badania finansowane w ramach prac własnych Politechniki Białostockiej WZ/WB-IIŚ/5/2022 oraz przez Instytut Inżynierii Środowiska SGGW.*

Przyjęto do druku: 26.02.2024 r.