

OCENA MIKROKLIMATU SALI DYDAKTYCZNEJ Z WENTYLACJĄ NATURALNĄ

inż. Cezary Kulis¹, dr inż. Marek Bogacki²

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów fizycznych takich jak: temperatura, wilgotność względna oraz stężenie CO₂, opisujących stan powietrza wewnętrznego panującego w sali wykładowej podczas trwania zajęć, a także ocenę jakości powietrza wewnętrznego i komfortu cieplnego w kontekście ich wpływu na użytkowników pomieszczenia. Do oceny mikroklimatu wykorzystane zostały wskaźniki PD_{IAQ} (Percentage of Dissatisfied with Indoor Air Quality), PMV (Predictive Mean Vote) oraz PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).

Słowa kluczowe: mikroklimat, komfort cieplny, jakość powietrza wewnętrznego

1. Wprowadzenie

Człowiek spędza większość swojego czasu w pomieszczeniach zamkniętych. Przebywając w domu, szkole czy pracy, przebywa w sztucznie wytworzonym mikroklimacie. Mikroklimat pomieszczenia definiuje się jako wielkość, przedstawiającą łączny wpływ parametrów fizycznych otoczenia w pomieszczeniu, wywierającą wpływ na bilans cieplny człowieka oraz sposób jego oddychania [1]. Do podstawowych parametrów opisujących mikroklimat pomieszczeń należą [2]:

- temperatura powietrza wewnętrznego,
- wilgotność względna powietrza,
- prędkość ruchu powietrza w okolicy człowieka,
- temperatura promieniowania cieplnego przegród budowlanych,
- czystość i zapach powietrza,

¹ Student studiów stacjonarnych II stopnia, na kierunku Inżynieria Środowiska w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, al. Adama Mickiewicza 30, tel. +48 (12) 617 45 03, e-mail: cezary.kulis@gmail.com

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, 30-059 Kraków, al. Adama Mickiewicza 30, tel. +48 (12) 617 45 03, e-mail: bogacki@agh.edu.pl

- stopień i rodzaj zjonizowania powietrza,
- hałas i drgania,
- oddziaływanie słońca przez przegrody przezroczyste.

Parametry cieplno-wilgotnościowe (temperatura powietrza i promieniowania, prędkość powietrza, wilgotność) wpływają na odczucie komfortu cieplnego, definiowanego jako stan w którym człowiek nie odczuwa ani gorąca, ani chłodu [3]. Przewidywanie odczucia komfortu cieplnego przez użytkowników, dla dowolnej kombinacji parametrów cieplno-wilgotnościowych oraz wydatku energetycznego człowieka i izolacyjności jego odzieży, możliwe jest poprzez wykorzystanie wskaźnika porównawczego PMV (Predictive Mean Vote). Ponieważ człowiek posiada ograniczoną zdolność dostosowania się do warunków otoczenia oraz wskutek różnic biologicznych, nie jest możliwe stworzenie warunków komfortu dla wszystkich użytkowników przebywających w pomieszczeniu, o spełnieniu warunków komfortu cieplnego pomieszczenia mówi się, gdy możliwie największy odsetek użytkowników pomieszczenia odczuwa stan obojętnego odczuwania warunków cieplnych. Odsetek określa się przy pomocy wskaźnika PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), wyznaczanego w funkcji wskaźnika PMV, według wzoru empirycznego stworzonego na podstawie wyników wielu badań statystycznych [1].

Komfort cieplny oraz jakość powietrza wewnętrznego to zagadnienia występujące w ścisłej korelacji. Temperatura oraz wilgotność powietrza znacząco wpływają na odczuwaną przez człowieka jakość powietrza. Wzrost entalpii powoduje odczuwanie tego powietrza, jako powietrze niższej jakości, pomimo identycznego składu chemicznego. Potwierdzają to badania które wykazały, że wzrost entalpii powietrza powoduje zwiększenie wskaźnika DP_{IAQ} , określającego odsetek niezadowolonych z jakości powietrza wewnętrznego, z poziomu kilku do nawet kilkudziesięciu procent. Z tych samych badań wynika, że powietrze suche i chłodne odbierane jest przez użytkowników pomieszczeń jako świeże [4].

Jakość powietrza w pomieszczeniach wpływa na wydajność pracy ich użytkowników, potwierdzają to liczne badania. W przypadku badań w biurach stwierdzono wzrost wydajności pracowników o 6,5% przy uzyskaniu dobrej jakości powietrza, poprzez usunięcie źródła zanieczyszczeń. Stwierdzono również, że pracownicy popełniali mniej błędów, oraz mniej uskarżali się na dolegliwości SBS (Sick Building Syndrom). Podobne rezultaty otrzymano w przypadku podniesienia jakości powietrza poprzez zwiększenie strumienia świeżego powietrza, doprowadzanego do pomieszczeń. Podwyższenie jakości powietrza korzystnie wpływa również na spadek absencji chorobowej [4]. Liczne badania [5-7] pokazują że jakość środowiska wewnętrznego, może mieć wpływ na koncentrację oraz wydajność uczenia się. Zależność oceniano na podstawie porównania różnic warunków mikroklimatu panujących w pomieszczeniach oraz różnic wyników uzyskanych z przygotowanych testów,

rozwiązywanych w tych pomieszczeniach przez uczniów. Badania nie potwierdzają długotrwałego wpływu na wydajność uczenia się. Krótkotrwałe efekty negatywnego wpływu są natomiast nadal kwestią dość dyskusyjną, ze względu na wpływ innych istotnych czynników, takich jak chociażby poziom nauczania w szkole, czy umiejętności nauczyciela oraz ze względu na niewystarczającą liczbę przeprowadzonych eksperymentów w tym zakresie. Jednakże rezultaty tych badań czynią komfort cieplny oraz jakość powietrza wewnętrznego kwestiami niewątpliwie istotnymi dla budynków szkolnych [5]. Niestety, liczne badania pokazują, że warunki panujące w pomieszczeniach wielu budynków szkolnych są niezadowalające. Najczęstszym powodem jest zbyt mały wydatek wentylacji, podniesiona i zróżnicowana temperatura, niewystarczająca konserwacja systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji [6]. Bezpośrednią przyczyną tych problemów jest niski poziom budżetów szkół oraz trend zbyt dużego przywiązywania wagi do oszczędzania energii kosztem innych parametrów. Przykładem są termomodernizacje budynków. Uszczelnienie budynku poprzez wymianę stolarki powoduje osłabienie działania systemu wentylacji naturalnej, prowadząc do pogorszenia jakości powietrza w pomieszczeniu.

2. Charakterystyka obszaru badań

Ocenę mikroklimatu sali dydaktycznej na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie przeprowadzono w ramach tworzonej pracy inżynierskiej autora. W sali o kubaturze 278 m³ występuje system wentylacji naturalnej, wyposażony w dwa kanały wentylacji grawitacyjnej. Zamontowaną stolarkę okienną określa się jako szczelną. Pomiarów parametrów fizycznych powietrza dokonano z wykorzystaniem miernika wielofunkcyjnego Testo 435-4 wyposażonego w sondę: IAQ (Indoor Air Quality) składającą się z termistora NTC, pojemnościowego czujnika wilgotności oraz czujnika wykorzystującego metodę absorpcji promieniowania podczerwonego do pomiaru stężenia dwutlenku węgla oraz termoanemometru do pomiaru prędkości powietrza. Badania prowadzono w 2015 r. w okresie grzewczym. Obciążenie sali użytkownikami w poszczególnych dniach pomiarowych było niejednakowe, jednakże nigdy nie przekroczyło maksymalnej liczby przewidywanych osób w sali.

3. Metodyka badań

Pomiary odbywały się miesiącach listopad oraz grudzień, łącznie wykonano sześć serii pomiarowych, po dwie serie dla każdej konfiguracji stopnia otwarcia

okien. Ustalono trzy stopnie otwarcia okien: okna zamknięte, 25% (2 okna) oraz 50% (4 okna). Okna otwierano sposobem górnego odchylenia okna. Sondę ustawiono w przedniej części sali, w centralnej części biurka na wysokości 1,15 m, odpowiadającej poziomowi wysokości głowy użytkowników w pozycji siedzącej. Pomiary temperatury otoczenia oraz wilgotności prowadzono w cyklach 10 minutowych. Pierwszy pomiar dokonywany był przed wejściem studentów do sali. Pomiar prędkości przepływu powietrza w kanałach wentylacji grawitacyjnej odbywał się z wykorzystaniem termooanemometru, podłączonego do urządzenia pomiarowego Testo 435-4. Pomiaru dokonywano na początku i pod koniec czasu trwania zajęć, w obydwu kanałach. Ponieważ w przewodach wentylacyjnych rzadko spełnione jest wymaganie dotyczące równomiernego rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym, dlatego w celu określenia średniej prędkości powietrza, zastosowano metodę podziału przekroju na określoną liczbę pól za pomocą „siatki”. W polach tych dokonywano pomiaru prędkości. Pomiary dokonywane były z rozdzielczością sekundową i uśredniane do 10 s. Pomiar prędkości powietrza wykonano w przekroju kratki wentylacyjnej z powodu braku możliwości umiejscowienia sondy bezpośrednio w kanale. Rozkład prędkości powietrza w takim miejscu jest nierównomierny, dlatego wykonywanie pomiarów w tym miejscu obarczone jest dużą niepewnością mierzonej wartości prędkości a tym samym niepewnością wyznaczanego strumienia przepływu powietrza [8]. W trakcie trwania pomiarów, stopień otwarcia okien nie był regulowany przez użytkowników. Ilość otwarcia okien w poszczególnych dniach pomiarowych była ustalona. Uzyskane wyniki umożliwiły określenie zmienności stężenia dwutlenku węgla w zależności od wielkości jednostkowego strumienia powietrza wentylującego na osobę. W oparciu o zmierzone parametry wyznaczono podstawowe wskaźniki komfortu cieplnego oraz jakości powietrza wewnętrznego, pozwalające określić ogólny komfort przebywania w pomieszczeniu.

Wykorzystany wskaźnik porównawczy PMV (Predicted Mean Value) umożliwia przewidywanie odczucia komfortu w funkcji wydatku energetycznego, izolacyjności odzieży, temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, wilgotności względnej powietrza oraz prędkości przepływu powietrza w strefie przebywania. Jako miarę porównawczą dla odczuć cieplnych przyjęto siedmiostopniową psychofizyczną skalę ocen, która ma postać symetrycznego rozkładu wokół punktu zerowego, oznaczającego stan odczuć obojętnych. Dla każdej wartości wskaźnika PMV możliwe jest określenie wskaźnika PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), przedstawiającego liczbę osób niezadowolonych, dla których odczucia cieplne nie są obojętne. Indywidualne różnice w odczuwaniu mikroklimatu uniemożliwiają zapewnienie komfortu cieplnego wszystkim użytkownikom pomieszczenia [9].

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,3353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2) \quad (1)$$

Do oceny poziomu jakości powietrza wewnętrznego posłużono się wskaźnikiem PD_{IAQ} , (Percentage of Dissatisfied with Indoor Air Quality) określającego odsetek niezadowolonych z jakości powietrza wewnętrznego w zależności od stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym [10].

$$PD_{IAQ} = 395 \cdot \exp[-15,15 \cdot (C_{CO_2})^{-0,25}] \quad (2)$$

4. Analiza wyników i dyskusja

Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie zmienności stężenia dwutlenku węgla w powietrzu pomieszczenia w zależności od jednostkowego strumienia powietrza wentylującego, wyrażonego na jedną osobę. Jako że człowiek jest jedynym źródłem zanieczyszczenia powietrza tym gazem, poziom stężenia wzrastał znacznie szybciej w przypadku mniejszych wartości powietrza wentylującego. W przypadku otwarcia czterech okien, stężenie dwutlenku węgla w pomieszczeniu charakteryzuje się małymi przyrostami wartości w czasie, co można zinterpretować jako efekt sprawnego działania systemu wentylacyjnego. Należy mieć na uwadze, że do utrzymania takiego stanu potrzebne było otwarcie aż czterech okien, co mogło spowodować dyskomfort przebywania w pomieszczeniu poprzez wystąpienie przeciągów, a także generować istotne straty ciepła. Zmienność stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym, pomniejszonego o wartość tego stężenia w powietrzu zewnętrznym przedstawiono na wykresie, na którym zaznaczano poziomy stężenia dwutlenku węgla odpowiadające wytycznym projektowym do utrzymania odpowiedniej kategorii powietrza wewnętrznego (WEW 1-4) według normy [11] (rys. 1).

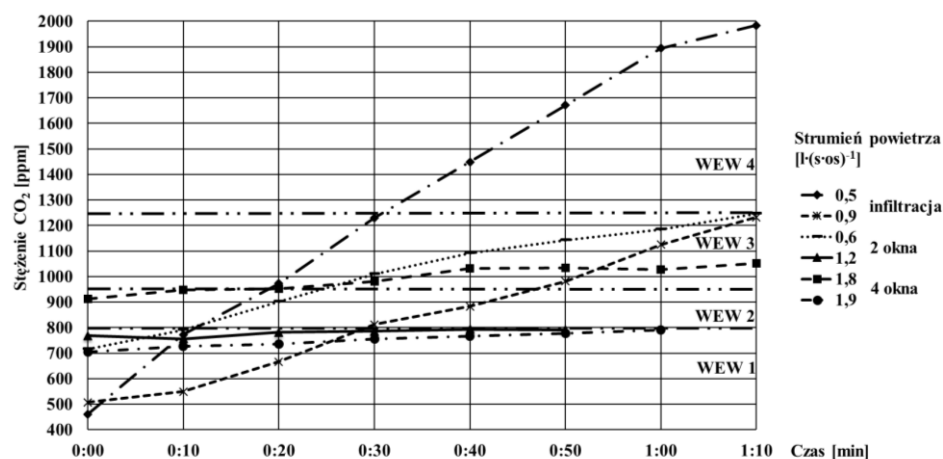
Oceny jakości powietrza wewnętrznego dokonano z wykorzystaniem wskaźnika PD_{IAQ} , który przedstawia procent użytkowników, dla których jakość powietrza była niezadowalająca. Wykonano obliczenia dla warunków początkowych oraz końcowych każdej serii pomiarowej. Wyniki przedstawiono na wykresie funkcji PD_{IAQ} (rys. 2).

Na podstawie pomierzonych wartości parametrów cieplno-wilgotnościowych powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu oraz przyjętych wartości pozostałych czynników:

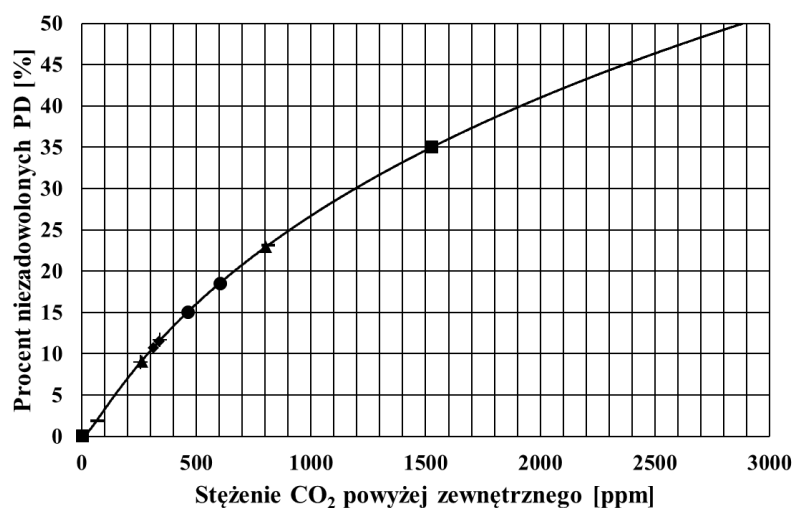
- wydatek energetyczny – $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (1,2 met),
- izolacyjność cieplna odzieży – 1 clo ($0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),

wyznaczono wskaźniki PMV oraz PPD dla wszystkich wartości zmiennych

zmiierzonych parametrów powietrza. Dodatkowo założono, że temperatura promieniowania cieplnego równa jest temperaturze powietrza, oraz że prędkość powietrza w strefie przebywania ludzi wynosi 0,1 m/s. Zakres obliczonych wartości wskaźnika porównawczego PMV oraz udziałów osób niezadowolonych z panujących warunków cieplnych, przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Wykres zmienności stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym dla uzyskanych wielkości strumienia powietrza wentylującego

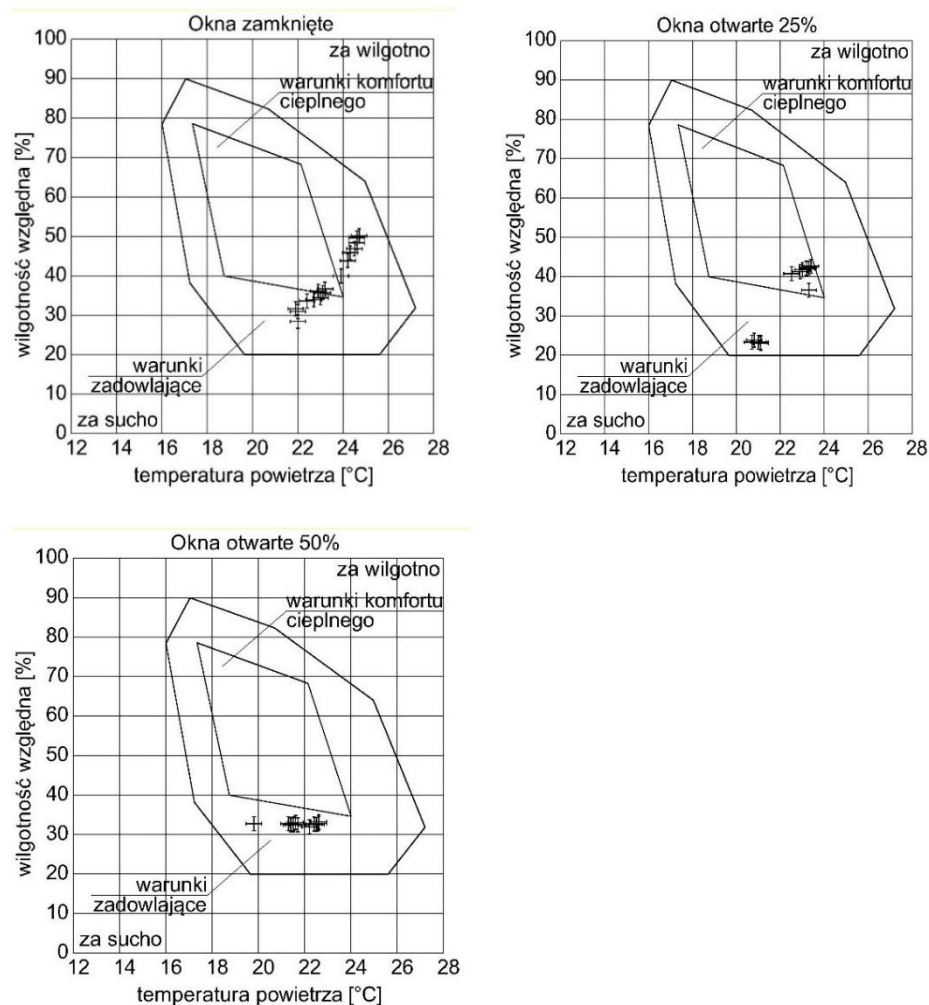


Rys. 2. Wykres PD_{IAQ} odsetka niezadowolonych z jakości powietrza w pomieszczeniu

Tabela 1. Zakresy obliczonych wskaźników oceny komfortu cieplnego oraz kategoria pomieszczenia w danych warunkach

Strumień powietrza [l·(s·os) ⁻¹]	0,5	0,6	0,9	1,2	1,75	1,9
PMV	0,26–0,68	0,13–0,34	-0,21–0,23	-0,35–(-0,27)	-0,49–0,12	0,2–(-0,17)
PPD	6,4–14,7	5,4–7,4	5–6,1	6,5–7,5	5,1–10	5–5,6
Kategoria	B	B	B	B	B	A

Zaleca się aby wartość wskaźnika PPD wynosiła mniej niż 10%, co odpowiada zakresowi PMV od -0,5 do +0,5. Warunek ten został spełniony w każdym dniu pomiarowym, jednakże warunki panujące w sali podczas dokonywania oceny w większości nie spełniały ogólnie przyjętych kryteriów dotyczących wilgotności względnej powietrza, której wartość powinna zawierać się w przedziale 40-60%, oraz temperatury powietrza, która dla okresu grzewczego powinna przyjmować wartość od 20 °C do 22 °C. Dlatego niesłuszne byłoby stwierdzenie, że w danych dniach warunki panujące w sali dydaktycznej spełniały warunki komfortu cieplnego (rys. 3). Natomiast zostały one spełnione, kiedy okna pozostawały zamknięte podczas całego czasu trwania zajęć a jednostkowy strumień powietrza na osobę wynosił jedynie 0,5 l·s⁻¹. W tym dniu wartość minimum higienicznego stężenia dwutlenku węgla (1000 ppm) w powietrzu została przekroczona dwukrotnie, co w pewnym stopniu obrazuje przypadkowość spełniania niektórych wskaźników oceny jakości środowiska wewnętrznego w przypadku systemów naturalnej wentylacji oraz nieustalonych warunków.



Rys. 3. Wyniki pomiarów temperatury i wilgotności zaznaczone na wykresie obszaru komfortu cieplnego (wg Leusdena i Freymarka)

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono ocenę mikroklimatu sali dydaktycznej z wentylacją naturalną. Oceny dokonano na podstawie zmierzonych parametrów powietrza wewnętrznego takich jak: temperatura powietrza, wilgotność względna, stężenie dwutlenku węgla w powietrzu. Do oceny posłużono się wskaźnikami PMV, PPD oraz PD_{IAQ} . Na podstawie wyliczeń wymienionych wskaźników oraz

ogólnie przyjętych kryteriów oceny mikroklimatu należy stwierdzić, że standardy komfortu przebywania w pomieszczeniu nie zostały dotrzymane. Pomimo prawidłowych wskaźników, komfort cieplny w pomieszczeniu podczas większości zajęć nie został osiągnięty głównie ze względu na zbyt suche powietrze, które mogło być uciążliwe dla użytkowników sali. Poza dniem w którym jednostkowy strumień powietrza utrzymywał się na poziomie $0,5 \text{ l} \cdot (\text{s} \cdot \text{os})^{-1}$, kiedy wilgotność względna powietrza wynosiła około 40%, jednakże w tym dniu odnotowano dwukrotne przekroczenie minimum higienicznego dotyczącego stężenia dwutlenku węgla w pomieszczeniu. Według przyjętego modelu empirycznego, aż 35% użytkowników mogło być niezadowolonych z jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu pod koniec czasu trwania zajęć. Zauważono, że jakość powietrza wewnętrznego utrzymywała się w przybliżeniu na stałym poziomie przy zapewnieniu jednostkowego strumienia powietrza zewnętrznego na jednego użytkownika równego: 1,2, 1,8 oraz 1,9 litra na sekundę ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$). Wartości te znacząco odbiegają od wartości zalecanych w normach oraz wytycznych do projektowania systemów wentylacji w pomieszczeniach. Według polskiej normy [12], wartość ta powinna wynosić $8,3 \text{ l} \cdot (\text{s} \cdot \text{os})^{-1}$, natomiast według amerykańskiego ASHRAE [10] oraz Europejskiego Komitetu Standaryzacji [11] dla pomieszczeń klasyfikowanych do kategorii A zaleca się utrzymywanie strumienia powietrza na poziomie $10 \text{ l} \cdot (\text{s} \cdot \text{os})^{-1}$.

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniu ze zmienną liczbą użytkowników, jednym z najlepszych rozwiązań jest zastosowanie wentylacji mechanicznej sterowanej na żądanie DVC (Demand-Controlled Ventilation), wykorzystującej zmianę stężenia dwutlenku węgla w powietrzu do sterowania wielkością dostarczanego powietrza świeżego [13]. Takie rozwiązanie najczęściej umożliwia zredukowanie strat ciepła przez wentylację. Należy jednak mieć na uwadze, że utrzymywanie stężenia dwutlenku węgla na stałym, niskim poziomie nie zawsze gwarantuje uzyskanie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego, ze względu na występowanie innych czynników wpływających na jego odbiór przez użytkowników. Takie rozwiązanie wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, często uniemożliwiającymi jego wdrożenie w budynkach szkolnych z powodu niskich budżetów szkół. W przypadku szkół mieszczących się w starych budynkach, dodatkowymi ograniczeniami mogą być cechy konstrukcyjne budynku, które z powodu regulacji prawnych mogą uniemożliwiać zainstalowanie systemu wentylacji mechanicznej. W pracy [14], jako rozwiązanie bardziej ekonomiczne zaproponowano wprowadzenie urządzenia mierzącego stężenie dwutlenku węgla oraz informującego użytkowników o jego poziomie. Rozwiązanie umożliwia kontrolowanie jakości powietrza w pomieszczeniu z wentylacją naturalną poprzez zwiększanie stopnia otwarcia okien, co zostało sprawdzone dla łagodnych warunków zewnętrznych (np. obszar wiejski).

Literatura

- [1] Fanger, P. O.: Komfort cieplny, Arkady, Warszawa, 1974.
- [2] Gładyszewska-Fiedoruk K.: Badania stężenia dwutlenku węgla w sali dydaktycznej, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 2009, nr 5.
- [3] Pelech A.: Wentylacja i klimatyzacja, IV, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [4] Fanger, P.O., Popiołek, Z., Wargocki, P.: Środowisko wewnętrzne: wpływ na zdrowie, komfort i wydajność pracy, Politechnika Śląska, Gliwice, 2003.
- [5] Petersen, S., et al.: The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children, Indoor Air, 2015, n/a.
- [6] Bakó-Biró, Z., et al.: Ventilation rates in schools and pupils' performance, Building and Environment, 2012, 48: 215-223.
- [7] Turunen, M., et al.: Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2014, 217: 733-739.
- [8] PN-EN 12599:2013 Wentylacja budynków - Procedury badań i metody pomiarowe stosowane podczas odbioru instalacji wentylacji i klimatyzacji.
- [9] 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.
- [10] ASHRAE. HVAC Fundamentals Handbook. 2001.
- [11] PN-EN 13779:2008 „Wentylacja budynków niemieszkalnych – Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji.
- [12] CEN CR 1752:1998 Ventilation for Buildings. Design Criteria for the Indoor Environment.
- [13] Poędnik, B.: Zanieczyszczenia a jakość powietrza wewnętrznego w wybranych pomieszczeniach, PAN Komitet Inżynierii Środowiska, Lublin, 2013.
- [14] Wargocki, P., Faria Da Silva, N. A.: Use of CO₂ feedback as a retrofit solution for improving air quality in naturally ventilated classrooms, Opublikowano: 10th International Conference on Healthy Buildings, Brisbane, Australia, 2012 [[http://orbit.dtu.dk/en/publications/use-of-co2-feedback-as-a-retrofit-solution-for-improving-air-quality-in-naturally-ventilated-classrooms\(3954e2f1-d90b-4812-a725-177c2c722f69\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/use-of-co2-feedback-as-a-retrofit-solution-for-improving-air-quality-in-naturally-ventilated-classrooms(3954e2f1-d90b-4812-a725-177c2c722f69).html)]

ASSESSMENT OF MICROCLIMATE CLASSROOMS WITH NATURAL VENTILATION

Summary: The paper presents the results of measurements of the physical parameters such as temperature, relative humidity and CO₂ concentration, describing the state of indoor air in the classroom during lessons, as well as the assessment of indoor air quality and thermal comfort in terms of their impact on the users of the room. To evaluate the microclimate were used indicators such as: PD_{IAQ} (Percentage of Dissatisfied with Indoor Air Quality), PMV (Predictive Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).

Key words: microclimate, thermal comfort, indoor air quality