

Elżbieta SŁODCZYK¹ i Dariusz SUSZANOWICZ¹

BADANIA PARAMETRÓW JAKOŚCI POWIETRZA W SALACH DYDAKTYCZNYCH

RESEARCH ON AIR QUALITY PARAMETERS IN THE EDUCATIONAL FACILITIES

Abstrakt: Zamieszczono wyniki badań parametrów jakości powietrza w pomieszczeniach dydaktycznych różnej wielkości. W pomieszczeniach, w których realizowany jest proces dydaktyczny z udziałem dużych grup studentów, powinien być zapewniony odpowiedni komfort klimatyczny, na który mają wpływ przede wszystkim: temperatura oraz wilgotność powietrza, jakość fizyczna i biologiczna powietrza, koncentracja CO₂. W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, iż w pomieszczeniach dydaktycznych nie powinno się stosować wentylacji grawitacyjnej. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono współczynniki emisji CO₂ przez studentów umożliwiające określenie parametrów pracy systemu wentylacji gwarantujące zapewnienie jakości powietrza w salach dydaktycznych.

Słowa kluczowe: stężenie CO₂, sale dydaktyczne, regulacja, system wentylacji

Wprowadzenie

W Polsce jakość środowiska wewnętrznego w budynkach dydaktycznych sprecyzowano wymaganiami zapisanymi w Polskiej Normie PN-EN 13779, 2008: Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji [1]. Zgodnie z ww. normą na odpowiedni komfort klimatyczny wpływają przede wszystkim: temperatura powietrza, wilgotność powietrza, jakość fizyczna i biologiczna powietrza oraz koncentracja CO₂.

Budynki dydaktyczne charakteryzują się znacznym zagęszczeniem osób przebywających w pojedynczym pomieszczeniu. Sytuacja taka powoduje, iż szczególnie ważne staje się zapewnienie osobom uczącym się odpowiednich warunków do wielogodzinnego przebywania w tego typu pomieszczeniach [2-4].

Administratorzy budynków dydaktycznych przywiązują wagę jedynie do zgodnej z normami temperatury i kosztów ogrzewania pomieszczeń dydaktycznych, nie skupiając się na pozostałych parametrach jakości powietrza określonych przez Polską Normę PN-EN 13779 [5]. Dlatego większość prac termomodernizacyjnych, mających na celu ograniczenie kosztów eksploatacji budynków dydaktycznych, sprowadza się jedynie do poprawy izolacyjności przegród zewnętrznych, tj. wymiany okien na energooszczędne oraz zwiększeniu warstwy izolacji ścian zewnętrznych. Zwiększenie szczelności pomieszczeń pogarsza działanie systemu wentylacji, co zmniejsza straty ciepła przez wentylację i zmniejsza koszty ogrzewania budynku, jednak powoduje zbyt małą wymianę powietrza i skutkuje istotnym pogorszeniem jakości powietrza w salach dydaktycznych [6-8].

Należy również podkreślić, iż w przypadku budynków mieszkalnych długotrwałe utrzymywanie się nadmiernej wilgotności powietrza w pomieszczeniach, spowodowane

¹ Samodzielna Katedra Inżynierii Procesowej, Uniwersytet Opolski, ul. R. Dmowskiego 7-9, 45-365 Opole, tel. 77 401 66 90, email: d.suzanowicz@uni.opole.pl

Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole' 16, Zakopane, 5-8.10.2016

niewłaściwą wentylacją, może doprowadzić do pojawiania się pleśni na wewnętrznych powierzchniach ścian, co może być wynikiem słabej izolacji cieplnej lub jej braku, ale też złej wentylacji oraz niedostatecznego ogrzewania, co w praktyce oznacza niewłaściwy sposób eksploatacji i konserwacji obiektu [9]. Natomiast w budynkach dydaktycznych często spotyka się sytuację, w której wilgotność powietrza jest zbyt niska, co obniża komfort przebywania przez dłuższy czas w takim pomieszczeniu.

Analizując wentylację obiektów dydaktycznych, zwrócono uwagę na utrzymanie zgodnych z wymogami parametrów powietrza w pomieszczeniach służących do przebywania dużych grup ludzi, zgodnie z Polską Normą PN-EN 13779, 2008, a w szczególności na trzy podstawowe parametry powietrza w pomieszczeniach, tj.:

- stężenie ditlenku węgla. W trakcie badań przyjęto jako dopuszczalne stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniach do przebywania ludzi, podane w 1858 roku przez niemieckiego fizjologa Pettenkofera, a jednocześnie zalecaną przez europejski oddział Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) - wynoszące 1000 ppm [10, 11],
- temperaturę powietrza, która zgodnie z normą w sezonie zimowym wynosi 20-22°C, a latem 24-26°C,
- wilgotność powietrza wewnątrz pomieszczeń, w lecie zalecane wartości wilgotności względnej wynoszą 30-50%, a zimą 45-60%.

Uwzględniając powyższe zalecenia, przeprowadzono badania mające na celu określenie parametrów wentylacji pomieszczeń dydaktycznych, gwarantujących zapewnienie komfortu klimatycznego w pomieszczeniach, w których realizowane są zajęcia ze studentami.

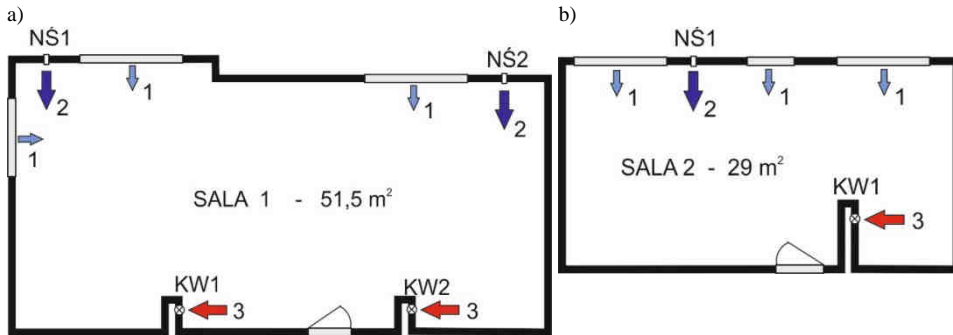
Metodyka badań

Znaczna część budynków dydaktycznych w polskich szkołach i uczelniach wyposażona jest w systemy wentylacji naturalnej. Z tego powodu zdecydowano o wyborze do realizacji badań dwóch sal dydaktycznych o różnej wielkości, jednak obydwu znajdujących się w budynku wyposażonym w systemy wentylacji grawitacyjnej. W budynku tym nie były prowadzone żadne prace termomodernizacyjne.

Pierwszy obiekt to sala wykładowa o powierzchni 51,5 m² (przedstawiona na rysunku 1a), w której znajdują się dwa kanały wentylacyjne KW1 oraz KW2. Drugi obiekt to sala seminaryjna o powierzchni 29 m² (przedstawiona na rysunku 1b), w której znajduje się jeden kanał wentylacyjny KW1. W obydwu salach świeże powietrze wprowadzane jest poprzez nieszczelności w stolarnie okiennej (na rysunku strumień powietrza świeżego zaznaczono symbolem 1), a powietrze zużyte odprowadzane jest poprzez kanały wentylacyjne (na rysunku strumień powietrza zużytego zaznaczono symbolem 3) grawitacyjnie.

Pomiary parametrów powietrza wewnątrz obiektów badawczych mierzono podczas zajęć dydaktycznych, przy różnej liczbie studentów oraz różnej ich aktywności. W początkowych seriach badań w pomieszczenia działała jedynie wentylacja naturalna. Podczas badań rejestrowano: stężenia ditlenku węgla, temperaturę i wilgotność powietrza wewnątrz sal, temperaturę powietrza na zewnątrz budynku oraz prędkość przepływu powietrza w kanałach wentylacyjnych. Wszystkie badania jakości powietrza wewnętrznego były wykonywane na różnych wysokościach i w różnych miejscach na całej powierzchni

pomieszczenia, a następnie wyznaczano wartość średnią. Pomiary prowadzone były przez cały dzień, rejestrując parametry powietrza co 15 minut, również w okresie przerw między zajęciami. Pomiary w pomieszczeniach wentylowanych jedynie za pomocą wentylacji grawitacyjnej prowadzono w okresie od października do kwietnia, czyli zarówno w trakcie sezonu grzewczego, jak i w okresie, kiedy sale nie były ogrzewane.



Rys. 1. Obiekty dydaktyczne poddane badaniom: a) sala wykładowa, b) sala seminaryjna; 1 - strumień powietrza świeżego wprowadzanego przez nieszczelne okna, 2 - strumień powietrza świeżego wprowadzanego przez nawietrzaki ścienne (NS), 3 - strumień powietrza zużytego odprowadzanego przez kanały wentylacyjne (KW)

Fig. 1. Research facilities: a) lecture hall, b) seminar room; 1 - fresh air flow introduced by window leaks, 2 - fresh air flow introduced by wall ventilators, 3 - stale warm air flow exhausted by the ventilation ducts

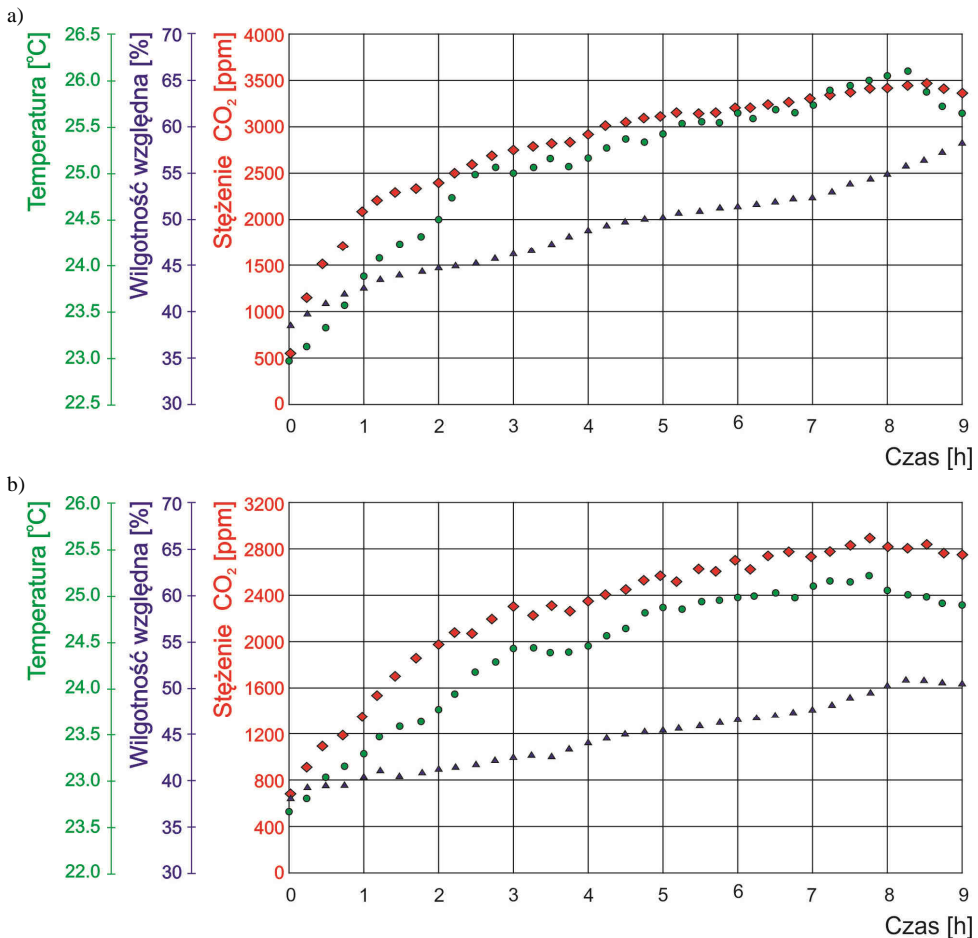
Przy działaniu wentylacji naturalnej w przerwach między zajęciami niezbędne było wietrzenie pomieszczeń poprzez otwieranie okna. W przypadku niskich temperatur zewnętrznych strumień powietrza zewnętrznego podczas przewietrzania sal powodował znaczne obniżenia temperatury wewnętrznej. Sytuacja taka była niezgodna z zalecaną minimalną temperaturą dla sal dydaktycznych wynoszącą 20°C. Z tego powodu podjęto decyzję o przeprowadzeniu prac modernizacyjnych, które obejmowały: zamontowanie w kanałach wentylacyjnych wentylatorów wyciągowych (oznaczonych na rys. 1 symbolami KW) oraz zainstalowanie nawietrzaków ściennych (oznaczonych na rys. 1 symbolami NS). Ponieważ w czasie dnia w salach odbywają się zajęcia, w których uczestniczą grupy o różnej liczbie studentów, zastosowanie wentylacji mechanicznej pozwala na regulację strumienia powietrza odprowadzanego z pomieszczeń. Po modernizacji przeprowadzonej w obu obiektach prowadzono kolejną serię pomiarów, realizowanych w okresie: maj-czerwiec oraz wrzesień-grudzień. Okres realizacji drugiej serii badań dobrano tak, aby obejmował zarówno czas sezonu grzewczego, jak i okres bez ogrzewania, co pozwala na porównywanie wyników uzyskanych w serii badań przed modernizacją z wynikami uzyskanymi po zmianie wentylacji sal z naturalnej na wymuszoną.

Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania parametrów powietrza wewnętrznego w obu obiektach badawczych przy wentylacji naturalnej wykazały, iż po kilkudziesięciu minutach przebywania studentów w salach dydaktycznych stężenie ditlenku węgla i temperatura

powietrza przekraczały wartości zalecane w Polskiej Normie PN-EN 13779. Natomiast wartość wilgotności względnej powietrza, mimo że w trakcie zajęć wzrastała, nie osiągała wartości zalecanej.

W budynku, w którym prowadzono badania, rejestrowano również parametry powietrza zewnętrznego. Uzyskane wyniki pozwalają przyjąć, iż tło CO_2 w powietrzu zewnętrznym osiąga średnią wartość na poziomie 480 ppm. Natomiast wyznaczone w trakcie badań średnie temperatury miesięczne odpowiadają wartościom podawanym w bazie danych klimatycznych dla Polski, opracowanej przez Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej na podstawie badań z 30-letniego okresu dla stacji meteorologicznej Opole [12].



Rys. 2. Przebieg zmienności stężenia ditlenku węgla, temperatury i wilgotności względnej powietrza: a) w sali wykładowej, b) w sali seminaryjnej

Fig. 2. CO₂ concentration, temperature and relative humidity variation: a) in the lecture hall, b) in the seminar room

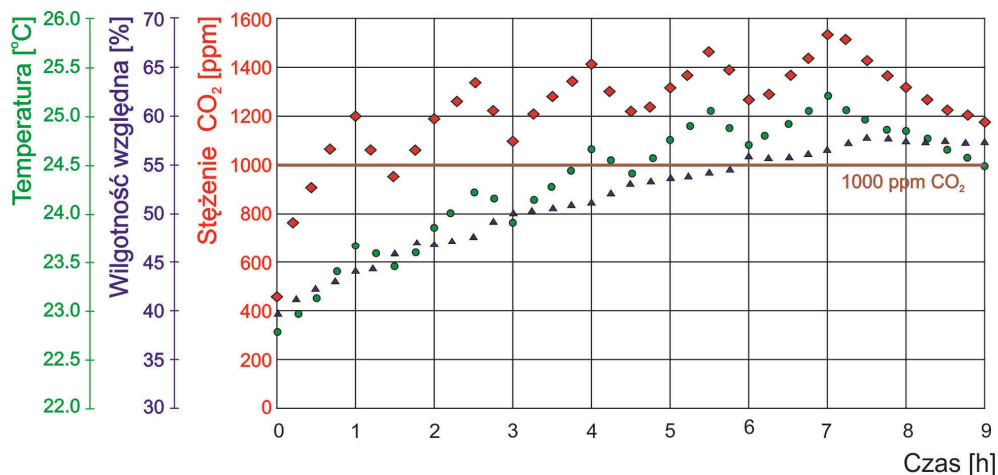
Jak wiadomo, każda osoba przebywająca w pomieszczeniu zamkniętym jest źródłem emisji ditlenku węgla. W zależności od aktywności podczas różnych form zajęć dydaktycznych oraz metabolizmu poszczególnych studentów jednostkowe emisje ditlenku węgla przez pojedynczego studenta mogą przyjmować różne wartości. Analizując uzyskane wyniki badań, przyjęto, iż średnio każda osoba przebywająca w sali dydaktycznej podczas zajęć wykładowych lub seminaryjnych jest źródłem emisji 12 dm^3 ditlenku węgla na godzinę. Wartość ta jest oczywiście w dużym stopniu uzależniona od rodzaju aktywności fizycznej studentów podczas zajęć.

Przykładowe przebiegi zmienności stężenia ditlenku węgla, temperatury i wilgotności względnej powietrza w badanych salach: a) wykładowej o powierzchni $51,5 \text{ m}^2$, b) seminaryjnej o powierzchni 29 m^2 przedstawiono na rysunku 2.

Jak wykazały wyniki prowadzonych badań, stężenie ditlenku węgla w obiektach badawczych pod koniec dnia zajęć osiągało wartości przekraczające nawet 3500 ppm. Sytuację taką można również zaobserwować na wykresie przedstawionym na rysunku 2a. Przeprowadzono również próby, podczas których w celu obniżenia stężenia ditlenku węgla w sali zwiększano dopływ powietrza świeżego do pomieszczeń, rozszczelniając pomieszczenie poprzez otwieranie okna oraz drzwi. Działanie takie było jednak dość uciążliwe dla prowadzenia procesu dydaktycznego ze względu na hałas dochodzący z zewnątrz budynku. Przewietrzanie sal poprzez okresowe otwieranie okien powoduje również spadki temperatury powietrza wewnętrznego poniżej wartości zalecanej w Polskiej Normie PN-EN 13779. Jednak, jak wykazały przeprowadzone eksperymenty, nawet wietrząc salę wykładową kilka razy w ciągu dnia, nie można utrzymać stężenia ditlenku węgla poniżej 1000 ppm w sali wentylowanej jedynie grawitacyjnie. Należy więc jednoznacznie stwierdzić, iż wentylacja naturalna, która nie stwarza możliwości regulacji przepływu powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniu, nie powinna być stosowana w pomieszczeniach, w których prowadzone są zajęcia dydaktyczne ze studentami. Właściwą regulację strumienia powietrza wentylacyjnego zapewnia jedynie wentylacja mechaniczna, dlatego dalsze badania prowadzone były po wykonaniu w obydwu obiektach badawczych prac modernizacyjnych obejmujących: zamontowanie w kanałach wentylacyjnych wentylatorów wyciągowych oraz zainstalowanie nawietrzaków ściennych. W celu precyzyjnej regulacji parametrów pracy wentylatorów zainstalowano programatory umożliwiające ustalanie liczby cykli pracy w ciągu godziny i czasu ich trwania. Tak zmodernizowany system wentylacji mechanicznej pozwala na regulację strumienia powietrza odprowadzanego z badanych sal, niezbędnego do uzyskania krotności wymiany powietrza w sali dydaktycznej zakładanego dla danej serii pomiarowej.

W obydwu salach po modernizacji systemów wentylacji prowadzono badania, rejestrując parametry powietrza wewnątrz sal, a także parametry powietrza na zewnątrz budynku. Badania prowadzone zarówno w mniejszej sali seminaryjnej, jak i większej sali wykładowej wykazały podobne trendy zmian parametrów powietrza w przeliczeniu na jednego studenta. Przykładowy przebieg zmian parametrów powietrza w sali wykładowej przy uruchamianych okresowo wentylatorach wyciągowych przedstawiono na rysunku 3.

Jak widać, zastosowanie wentylatorów wyciągowych pozwala na obniżenie poziomu stężenia ditlenku węgla w trakcie trwania zajęć dydaktycznych, jednak bez precyzyjnej regulacji systemu wentylacji, połączonego z ciągłym monitoringiem parametrów powietrza, utrzymania stężenia ditlenku węgla na poziomie poniżej 1000 ppm nie udało się osiągnąć.



Rys. 3. Przykładowy przebieg zmian parametrów powietrza w sali wykładowej

Fig. 3. Selected air parameters variation in the lecture hall

Wykorzystując wyznaczony w trakcie badań współczynnik emisji ditlenku węgla oraz optymalny zakres krotności wymiany powietrza w pomieszczeniach - wynoszący $0,6 \text{ h}^{-1}$, a także bazując na zalecanych parametrach jakości powietrza zapisanych w normach, wyznaczono zależności modelowe pozwalające określać optymalny strumień powietrza zużytego odprowadzanego przez kanały wentylacyjne. Zależności te uwzględniają kubaturę pomieszczenia, liczbę studentów oraz parametry powietrza zewnętrznego (stężenie ditlenku węgla, temperaturę oraz wilgotność względną).

Za pomocą przygotowanych równań modelowych, znając wydajność wentylatorów wyciągowych oraz kubaturę pomieszczenia, można tak dobrać okresy pracy wentylatorów oraz przekroje poprzeczne nawietrzaków ściennych, aby zapewnić optymalną wartość krotność wymiany gwarantującą jakość powietrza w sali wykładowej zgodną w Polską Normą PN-EN 13779. Dobór optymalnych parametrów pracy systemu wentylacji mechanicznej za pomocą opracowanego równania modelowego pozwala jednocześnie na zmniejszenie strat ciepła z ogrzewanego pomieszczenia, wynikających z bardzo intensywnego procesu wentylacji. Pozwoli to w znaczący sposób obniżyć koszty eksploatacji budynku dydaktycznego.

Wnioski

W przebadanych pomieszczeniach dydaktycznych wyposażonych w wentylację naturalną wskazano przekroczenia norm dotyczących stężenia ditlenku węgla i temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń, natomiast wilgotność względna powietrza przez znaczącą część czasu wykonywania pomiarów osiągała wartości mniejsze od zalecanych. Uzyskane wyniki praktycznie wykluczają możliwość stosowania wentylacji grawitacyjnej w pomieszczeniach dydaktycznych.

Zaproponowana w trakcie badań modernizacja systemu wentylacji analizowanych sal dydaktycznych, realizowana poprzez zainstalowanie wentylatorów wyciągowych

w kanałach wentylacyjnych oraz nawietrzaków ściennych, pozwala osiągnąć jakość powietrza zbliżoną do zalecanej w Polskiej Normie PN-EN 13779 dla budynków dydaktycznych, w których nie ma możliwości technicznych zainstalowania systemu wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła.

Z wyników przeprowadzonych badań wyznaczono współczynnik emisji CO₂ przez studentów, uzależniony od kubatury pomieszczeń i liczby osób. Uśrednioną wartość emisji ditlenku węgla przez jednego studenta w ciągu godziny, stosowaną do wyznaczania parametrów pracy systemu wentylacji, przyjęto równą 12 dm³/h.

Sformułowano równania modelowe wyznaczania parametrów pracy systemu wentylacji pozwalające określać optymalne warunki wymiany powietrza w salach dydaktycznych za pomocą systemu wentylacji mechanicznej.

Literatura

- [1] Polska Norma PN-EN 13779 - Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji. 2008.
- [2] Bluysse PM, De Oliveira Fernandes E, Groes L, Clausen G, Fanger PO, Valbjørn O, et al. European indoor air quality audit project in 56 office buildings. *Indoor Air* 6. 1996;(4):221-238. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1996.00002.x.
- [3] Al horr Y, Arif M, Katafygiotou M, Mazroei A, Kaushik A, Elsarrag E. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *Inter J Sustainable Built Environ*. 2016;V(5):1-11. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006.
- [4] Frontczak M, Wargocki P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Build Environ*. 2011;46(4):922-937. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.10.021.
- [5] Müller J, Skrzyniowska D. Jakość powietrza a wentylacja pomieszczeń. *Technical Transactions Environ Eng*. 2012;28(109):37-49.
- [6] Kapalo P, Voznyak O. Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode. *J Civil Eng Environ Architect*. 2015;62(4/15):201-210. DOI: 10.7862/rb.2015.189.
- [7] Cichowicz R, Sabiniak H, Wielgosiński G. The influence of a ventilation on the level of carbon dioxide in a classroom at a higher university. *Ecol Chem Eng S*. 2015;22(1):61-71. DOI: 10.1515/eces-2015-0003.
- [8] Semprini G, Marinosci C, Ferrante A, Predari G, Mochi G, Garai M, Gulli R. Energy management in public institutional and educational buildings: The case of the school of engineering and architecture in Bologna. *Energy Build*. 2016;126:365-374. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.009.
- [9] Szmolke N. Audytorskie spojrzenie na wentylację szkół. *J Civil Eng Environ and Architect*. 2015;XXXII(62):459-467. DOI: 10.7862/rb.2015/75.
- [10] Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz. 2008;51(11):1358-1369. DOI: 10.1007/s00103-008-0707-2.
- [11] Krawczyk D, Rodero A, Gładyszewska-Fiedoruk K, Gajewski A. CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates - measurements and simulations. *Energy Build*. 2016;129:491-498. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.003.
- [12] Polska Norma PN-B-02025:2001 - Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego.

RESEARCH ON AIR QUALITY PARAMETERS IN THE EDUCATIONAL FACILITIES

Chair of Process Engineering, University of Opole

Abstract: Poor ventilation of didactic rooms can interfere with students' ability to concentrate and even cause them to suffer headaches. This is a significant issue as the ventilation systems of most lecture buildings in Poland do not provide proper air exchange. This paper presents findings of research on air parameters research in the didactic rooms of various sizes. Rooms for classes should ensure climatic comfort *i.e.* proper humidity and air temperature, physical and biological air quality, and low concentration of carbon dioxide. The research suggested that natural ventilation should not be used, and further research was done after the upgrading of ventilation systems and installation of exhaust fans. The coefficients of carbon dioxide emissions by one student depend on the number of people and size of the room were calculated. Designated coefficients will be used in the algorithm for determining the parameters of the fans in the ventilation system of the classrooms and lecture halls.

Keywords: carbon dioxide concentration, didactic rooms, regulation, ventilation system