

Joanna FERDYN-GRYGIEREK

Politechnika Śląska w Gliwicach

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania

JAKOŚĆ POWIETRZA I WENTYLACJA W BUDYNKACH EDUKACYJNYCH

Streszczenie. Jakość powietrza wewnętrznego jest jednym z czynników, które wpływają na tempo przyswajania wiedzy. Z tego powodu w wielu krajach wymagany jest wysoki poziom jakości powietrza w salach lekcyjnych. Stan taki możliwy jest do uzyskania jedynie drogą wzmożonej wentylacji.

W artykule przeanalizowano wpływ różnych systemów wentylacji na jakość powietrza wewnętrznego w typowej polskiej szkole. Jako kryterium jakości powietrza przyjęto stężenie CO₂.

Przeprowadzone analizy wykazują, że tradycyjnie stosowane w klasach szkolnych systemy wentylacji naturalnej nie są w stanie zapewnić właściwych warunków do zdobywania wiedzy. Stężenie dwutlenku węgla bardzo często przekracza 3000 ppm. Jakość powietrza polepsza regularne przewietrzanie sal w czasie przerw, jednak w okresach niskich temperatur zewnętrznych powoduje to znaczne wychładzanie pomieszczeń. Poprawa sytuacji w szkołach może być osiągnięta za sprawą stosowania systemów wentylacji mechanicznej, które pozwalają utrzymać stężenie dwutlenku węgla na poziomie 1000 ppm.

INDOOR AIR QUALITY AND VENTILATION IN EDUCATIONAL BUILDINGS

Summar. The indoor air quality is a factor which influences children's efficiency of learning. This is the reason why high level of indoor air quality in classrooms is required in many countries. It can be obtained only by sufficient enough ventilation.

The paper presents the results of the analysis of the impact of various ventilation systems on indoor air quality and energy consumption, performed for a typical Polish school building. The carbon dioxide concentration is used as air quality indicator.

The results clearly show that natural ventilation systems, traditionally applied in classrooms, cannot provide suitable conditions for learning. The CO₂ concentration is very often more than 3000 ppm. Indoor air quality is better when classrooms are regularly ventilated during breaks by opening the windows. However, during periods of low outdoor temperature it causes large decrease in the indoor temperature. Better quality of the indoor air

can be achieved by using mechanical ventilation, which makes it possible to keep CO₂ concentration at the level of 1000 ppm.

1. Wprowadzenie

Zagadnienia dotyczące jakości powietrza w budynkach edukacyjnych stanowią problematykę, która już od kilkunastu lat jest chętnie podejmowana i rozwijana we współczesnych badaniach naukowych. U podstaw tego zainteresowania leży przekonanie o ścisłym związku pomiędzy jakością środowiska a zdrowiem, dobrym samopoczuciem i tempem przyswajania wiedzy. Natomiast realizując prace termomodernizacyjne w budynkach edukacyjnych, inwestorzy i wykonawcy nie zawsze zdają sobie sprawę, jak te przedsięwzięcia wpływają na wentylację i zapewnienie komfortu przebywania w tego typu pomieszczeniach.

Budynki edukacyjne należy traktować jako budynki wyjątkowe przynajmniej z dwóch powodów. Po pierwsze charakteryzują się one dużym zagęszczeniem osób w pomieszczeniach, a po drugie użytkownicy to przede wszystkim dzieci.

Pod pojęciem budynków edukacyjnych można rozumieć budynki o pełnym spektrum cech funkcjonalnych, o charakterze [11]: czysto edukacyjnym (sale lekcyjne, wykładowe, seminaryjne), sportowym (sale gimnastyczne, centra sportowe), hotelowym (bursy, domy studenckie), szpitalnym (szpitale akademickie, poradnie akademickie), widowiskowym (sale audiowizualne, aule).

Problem jakości powietrza wewnętrznego w budynkach nabrał znaczenia wraz ze zmianami w technologii budowlanej i w wyposażeniu pomieszczeń. Szczelne okna są z jednej strony bardzo pożądane ze względów energooszczędnych, ale z drugiej ograniczające napływ powietrza zewnętrznego często poniżej ilości minimum higienicznego, przyczyniają się do powstania problemu zwanego syndromem chorego budynku. Nowoczesne, szczelne okna ograniczają w sposób zasadniczy naturalną wymianę powietrza. W mocno uszczelnionych budynkach z niewystarczającą wentylacją gromadzą się zanieczyszczenia chemiczne z dywanów, mebli i środków czyszczących. Przez otwarte okna, szczeliny w ścianach dostają się do budynku zanieczyszczenia zewnętrzne (spaliny samochodowe, pyłki kwiatowe). Coraz częściej medycyna wiąże objawy chorobowe (ból głowy, zmęczenie, senność, podrażnienie oczu i nosa, suchość w gardle, mdłości, niemożność skupienia się) nie tylko z wirusami i bakteriami, ale i z czynnikami występującymi w danym środowisku. W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabierają badania w zakresie efektów zdrowotnych związanych z zanieczyszczeniem powietrza wewnątrz pomieszczeń. Zagadnienie to jest szczególnie ważne między innymi ze względu na znaczący wzrost zachorowań na astmę na całym świecie [2]. Jak wykazały badania przeprowadzone w Stanach

Zjednoczonych [12], astma jest najczęstszym powodem leczenia dzieci i głównym źródłem ich nieobecności w szkołach, a problem ten ma tendencje wzrostowe. Savenstrand i inni [15], Daisey i Angell [4] oraz Carrer i inni [3] wykazali powiązanie pomiędzy środowiskiem wewnętrznym a zdrowiem uczniów i pracowników szkół. Udowodniono, że w wielu szkołach wymiana powietrza nie osiąga nawet minimum określonego w standardach.

Dzieci spędzają prawie 14000 godzin swojego życia, wdychając powietrze szkolnych budynków, a są one bardziej niż dorośli podatne na zanieczyszczenia powietrza [10]. Problem jakości powietrza wewnętrznego w szkołach jest szczególnie ważny, ponieważ dzieci są bardziej niż dorośli narażone na podrażnienia dróg oddechowych, a tym samym są one w grupie szczególnego ryzyka w związku z chorobami płuc będącymi wynikiem zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego [12]. Hanssen [8] podaje, że aż 40% uczniów jest uczulona na różnego rodzaju czynniki zewnętrzne, z czego ok. 20% zażywa regularnie leki. Z przeprowadzonych przez niego badań wynika, iż w wielu przypadkach problemy te są spowodowane złą jakością powietrza w szkole. Według Smedje i innych [16], połowa uczniów twierdzi, że ich praca umysłowa pogarszana jest przez złą jakość powietrza. Podobne wnioski wysunuli inni autorzy [1, 6]. Profesor Teresa Jędrzejewska-Ścibak [9] podaje, że 1% dzieci w wieku szkolnym cierpi na przewlekłe choroby układu oddechowego, czyli aż 70 tys. dzieci w Polsce wykazuje szczególną wrażliwość na stan jakości powietrza.

Funkcją wentylacji jest rozcieńczanie wytwarzanych zanieczyszczeń. W zamkniętych pomieszczeniach większość tych zanieczyszczeń to gazy naturalne produkowane przez ludzi, w tym przypadku przez uczniów i nauczycieli, oraz lotne związki organiczne pochodzące od wyposażenia pomieszczeń, a także bakterie i grzyby [22]. Biozanieczyszczenia wytwarzane przez ludzi oraz jednocześnie generowany metabolicznie dwutlenek węgla są ze sobą ściśle skorelowane. Sam dwutlenek węgla jest bezwonny i nie powoduje ujemnych reakcji. Stężenie CO₂ jest natomiast łatwe do zmierzenia, dlatego jest to bardzo dobry i powszechnie stosowany wskaźnik jakości powietrza wewnętrznego. Podczas przebywania ludzi w zamkniętych pomieszczeniach stężenie dwutlenku węgla jest znacznie wyższe niż w otoczeniu. W powietrzu wydychanym z płuc stężenie to wynosi aż 40 000÷50 000 ppm. Ilość dwutlenku węgla wydzielanego przez człowieka zależy przede wszystkim od jego aktywności, ale również od masy ciała, diety i stopnia wytrenowania organizmu, jest funkcją ilości zużywanego tlenu [17].

W większości norm określających niezbędny strumień powietrza wentylacyjnego stosuje się limit stężenia CO₂ wynoszący 1000 ppm, podany w 1858 roku przez niemieckiego fizjologa Pettenkofera [17]. Przy zwiększaniu się stężenia CO₂ w powietrzu obserwuje się u ludzi różne niekorzystne objawy związane z samopoczuciem i zdrowiem.

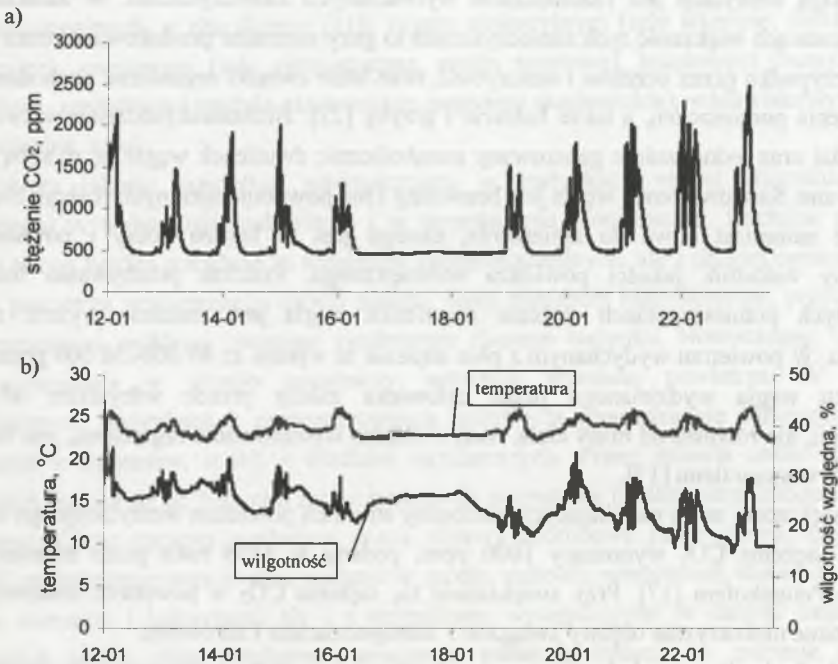
W budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej wymaganą intensywność wentylacji określa norma PN-83/B-03430/Az:2000. Podaje ona, że pomieszczenia przeznaczone do stałego i czasowego pobytu ludzi powinny mieć zapewniony dopływ co najmniej 20 m³/h powietrza zewnętrznego dla każdej osoby. Nieprzekraczanie

stężenia CO₂ w powietrzu wynoszącego 1 000 ppm wymaga dostarczenia 20+30 m³/h powietrza na jedną osobę – w przypadku ludzi o małej i średniej aktywności fizycznej [14]. W pomieszczeniach, gdzie przebywa wiele osób, obserwuje się jednak często bardzo wysokie poziomy stężenia dwutlenku węgla w powietrzu. Badania przeprowadzone w klasach szkolnych [19, 20, 21] wykazały, że stężenie CO₂ w powietrzu osiągało nawet poziom 3 000 ppm, panował zaduch i chemiczny zapach, a strumień powietrza przypadający na jedną osobę wynosił zaledwie 1÷10 m³/h.

W niniejszym artykule zajęto się analizą wentylacji i jakości powietrza w obiektach czysto edukacyjnych, analizą sal szkolnych.

2. Pomiary w istniejącym obiekcie

Do badań wybrano budynek szkoły podstawowej, 3-kondygnacyjny, wolnostojący, oddany do eksploatacji w latach 60. XX w. Obiekt nie był poddawany żadnym pracom renowacyjnym zarówno w zakresie ochrony cieplnej powłoki budynku, jak i wymiany stolarki okiennej.



Rys. 1. Przebieg zmienności stężenia dwutlenku węgla (a), temperatury i wilgotności względnej powietrza (b) w sali lekcyjnej w jednym tygodniu stycznia

Fig. 1. CO₂ concentration (a), temperature and relative humidity (b) variation in classroom in one week of January

System wentylowania budynku oparty był na naturalnej wentylacji grawitacyjnej, realizowanej za pomocą indywidualnych kanałów wentylacyjnych w każdym pomieszczeniu szkoły.

Pomiary przeprowadzone zostały w styczniu w jednej sali lekcyjnej o kubaturze 166 m^3 , zlokalizowanej na parterze po stronie południowo-wschodniej budynku. W sali tej w czasie lekcji przebywało 18 uczniów i jeden nauczyciel. W sali umieszczono miernik/rejestrator parametrów środowiska wewnętrznego PS 30 – temperatury, wilgotności względnej oraz stężenia CO_2 w powietrzu. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiaru.

W analizowanej sali w okresach przebywania uczniów występowało wysokie stężenie CO_2 w powietrzu, znacznie przekraczające 1000 ppm. Wskazuje to na niewystarczającą intensywność wentylacji tych pomieszczeń.

Z przebiegu stężenia dwutlenku węgla obliczono metodą zaniku stężenia [7, 18] liczbę wymian powietrza dla poszczególnych dni pomiarowych. Obliczone liczby wymian zawarły się w granicach $0,35\text{-}0,90 \text{ h}^{-1}$, co dało rażąco niski strumień powietrza przypadający na jedną osobę w zakresie $3\text{-}8 \text{ m}^3/\text{h}$. Dodatkowo sala była przegrzewana, temperatura wewnętrzna często sięgała 25°C , natomiast wilgotność względna powietrza była bardzo niska, średnio poniżej minimum wynoszącego 30%. Wszystko to świadczy o złej jakości powietrza wewnętrznego analizowanej sali lekcyjnej.

3. Analiza wpływu różnych systemów wentylacji na jakość powietrza

Wykorzystując symulację komputerową, przeanalizowano wpływ różnych wariantów wentylacji budynku na jakość powietrza w salach lekcyjnych.

Analizy przeprowadzono przy użyciu programu CONTAMW, służącego do wielostrefowej analizy wentylacji i jakości powietrza w budynku [5].

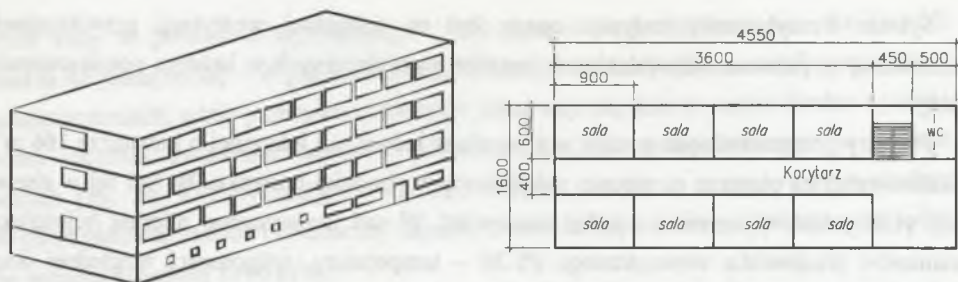
Jako wskaźnik jakości powietrza przyjęto stężenie dwutlenku węgla w salach szkolnych. Przyjęto dwa kryteria:

I – stężenie dwutlenku węgla w czasie trwania lekcji (netto) średnio w salach lekcyjnych w całym sezonie grzewczym dla dystrybuanty 50% nie powinno być większe niż 1000 ppm;

II – stężenie dwutlenku węgla w czasie trwania lekcji (netto) średnio w salach lekcyjnych w całym sezonie grzewczym dla dystrybuanty 90% nie powinno być większe 1200 ppm.

Obliczenia przeprowadzono na modelu szkoły podstawowej prowadzącej oddziały I-VI (por. rys. 2).

Jest to budynek zwarty, prostopadłościenny, 3-kondygnacyjny (wysokość kondygnacji $3,5 \text{ m}$) z kondygnacją przyziemia (wysokość kondygnacji przyziemia $2,5 \text{ m}$), z korytarzem szerokości 4 m obustronnie obudowanym izbami lekcyjnymi i holami rekreacyjnymi na każdej kondygnacji. Wejście główne znajduje się od strony wschodniej budynku.



Rys. 2. Analizowany budynek szkoły. Rozmieszczenie pomieszczeń na kondygnacji powtarzalnej
Fig. 2. Analysed school building. Rooms in the repeatable storey

Przeanalizowano 6 wariantów wentylacji budynku (por. rys. 3):

A: system wentylacji grawitacyjnej; budynek przed wymianą okien (współczynnik szczelności okien $a = 1,0 \text{ m}^3/(\text{mhPa}^{0,67})$ – stare okna bez uszczelek);

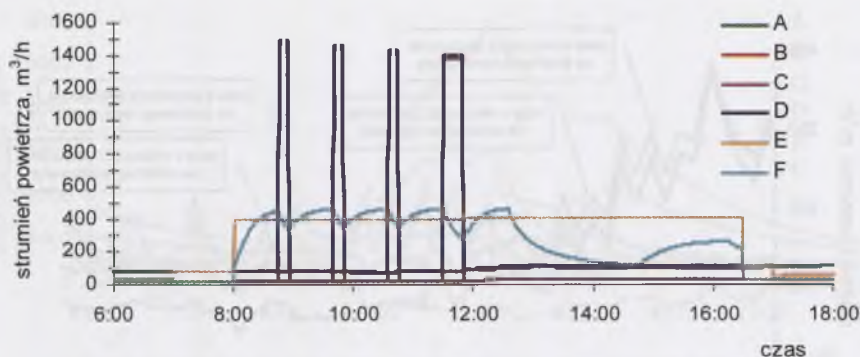
B: system wentylacji grawitacyjnej; budynek po wymianie okien (współczynnik szczelności okien $a = 0,2 \text{ m}^3/(\text{mhPa}^{0,67})$ – nowe okna z rozszczelnieniem);

C: system wentylacji grawitacyjnej, budynek po wymianie okien jak w wariancie **B**, sale lekcyjne są dodatkowo wietrzone w czasie przerw przez otwieranie okna o wymiarach $0,8 \times 1,4 \text{ m}$, w pozostałych pomieszczeniach okna są zamknięte;

D: system wentylacji grawitacyjnej, budynek po wymianie okien jak w wariancie **B**, okna wszystkich pomieszczeń wyposażone są w nawietrzaki powietrza, sale są wietrzone w czasie przerw, w pozostałych pomieszczeniach okna są zamknięte; w godzinach $17^{00}-7^{00}$ oraz w dni wolne od pracy nawietrzaki są przymknięte do 20% wydajności;

E: system wentylacji mechanicznej wywiewnej, okna wyposażone są w nawietrzaki powietrza, które działają jak w wariancie **D**, kanały wentylacji grawitacyjnej w salach lekcyjnych oraz w toaletach wyposażone są w wentylatory dachowe o stałej wydajności: sale $470 \text{ m}^3/\text{h}$, toalety $360 \text{ m}^3/\text{h}$; wentylatory działają w dni robocze w godzinach $8^{00}-16^{30}$, w pozostałym czasie działa wentylacja grawitacyjna;

F: system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej, sale wyposażone są w indywidualne centrale wentylacyjne z odzyskiem ciepła; centrale pracują w godzinach $8^{00}-16^{30}$ na zmiennym przepływie powietrza sterowanym stężeniem CO_2 , natomiast w pozostałym czasie działa wentylacja grawitacyjna.



Rys. 3. Strumień powietrza dla sześciu rozpatrywanych wariantów w wybranej sali lekcyjnej (sala usytuowana na ostatniej kondygnacji po stronie zachodniej budynku) w jednym dniu stycznia
 Fig. 3. Airflow in six analysed cases of selected single classroom (west classroom on the last floor) during one day of January

Obliczenia przeprowadzono dla całego sezonu grzewczego (od października do kwietnia) z uwzględnieniem przerw w nauce oraz dobowej zmienności obciążeń pomieszczeń. Przyjęto, że każda osoba jest źródłem emisji $13 \text{ dm}^3/\text{h}$ dwutlenku węgla. Tłó CO_2 w powietrzu zewnętrznym przyjęto na poziomie 400 ppm.

4. Wyniki

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano zbiory wyników zawierające wartości strumieni powietrza wentylacyjnego w każdej ze stref oraz rozkład stężenia dwutlenku węgla w salach lekcyjnych.

W budynkach z wentylacją naturalną wymiana powietrza jest mocno zróżnicowana. Strumień powietrza wywołany siłą wiatru i wyporem cieplnym zależy od usytuowania pomieszczeń w zależności od strony świata i kondygnacji. Pomieszczenia o ekspozycji zachodniej charakteryzuje największa wymiana powietrza. Z kolei najmniejszy przepływ powietrza występuje w pomieszczeniach na ostatniej kondygnacji o ekspozycji wschodniej. (por. rys. 4).

Uzyskaną średnią w sezonie grzewczym zmienność liczby wymian i strumienia powietrza wentylacyjnego (świeżego) dla rozpatrywanych wariantów (od października do kwietnia) przedstawiono w tabeli 1.

Tak zróżnicowana wymiana powietrza ma odzwierciedlenie w stężeniu zanieczyszczeń w salach. Przebieg zmienności stężenia dwutlenku węgla i jego skumulowany rozkład w sezonie grzewczym dla wybranej sali przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 4. Przebieg zmienności strumienia powietrza dla wybranego tygodnia sezonu grzewczego (wariant A) dla czterech przykładowych sal lekcyjnych o różnej ekspozycji

Fig. 4. Air flow variation for the given week of the heating season (case A) for 4 examples of the classrooms under different orientation

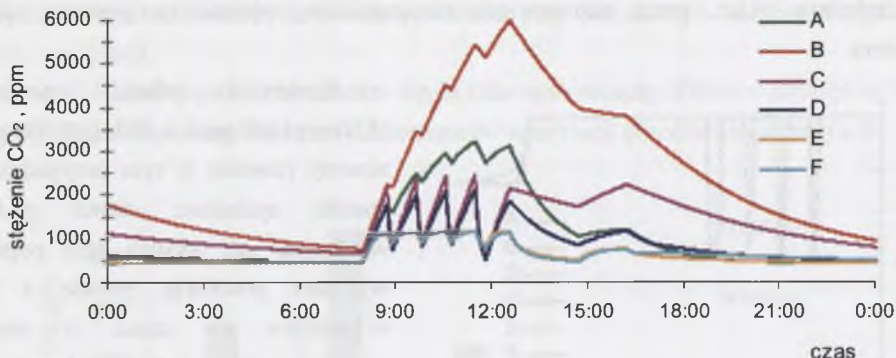
Przypadek A obrazuje stan szkoły przed modernizacją okien, w której nie podjęto również żadnych prac związanych z modernizacją systemu wentylacji. Wymiana powietrza na poziomie $1,0 \text{ h}^{-1}$ zapewnia słabą jakość powietrza, przy której stężenie dwutlenku węgla przekracza 3000 ppm (przy średniej wartości 1640 ppm).

Tabela 1

Liczba wymian powietrza wentylacyjnego w szkole

Wariant		A	B	C	D	E	F	
Liczba wymian, n, h^{-1} (strumień powietrza świeżego na osobę, m^3/h)	Dni robocze od 8 ⁰⁰ do 16 ³⁰	sale lekcyjne	1,0 (6,1)	0,3 (1,8)	0,8 (4,9)	1,6 (9,8)	2,6 (15,4)	1,7 (10,4)
		WC	1,1	0,2	0,2	2,0	3,1	2,4
		pozostałe pomieszczenia	0,8	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5
		średnia w całym budynku	1,0	0,3	0,4	1,4	2,1	1,5
	Dni robocze od 16 ³⁰ do 8 ⁰⁰ dni wolne od 0 ⁰⁰ do 24 ⁰⁰	sale lekcyjne	0,9	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3
		WC	1,0	0,2	0,2	0,6	0,6	0,4
		pozostałe pomieszczenia	0,8	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
		średnia w całym budynku	0,9	0,2	0,2	0,5	0,5	0,3

Z jednej strony wymiana stolarki okiennej poprawia energochłonność budynku (wariant B), z drugiej jednak zmniejszenie pięciokrotnie współczynnika szczelności okien spowodowało znaczne pogorszenie jakości powietrza w salach szkolnych. Stężenie CO_2 średnio sięga 2800 ppm, osiągając w szczycie nawet 6000 ppm (por. rys. 5).



Rys. 5. Przebieg zmienności stężenia dwutlenku węgla w sali lekcyjnej (sala usytuowana na ostatniej kondygnacji po stronie zachodniej budynku) w jednym dniu stycznia dla sześciu rozpatrywanych wariantów

Fig. 5. Six cases of CO₂ concentration variation in the single classroom (west classroom on the last floor) during one day of January

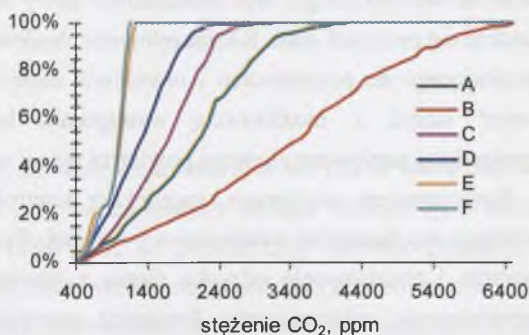
Taki wzrost stężenia CO₂ spowodowany jest bardzo małą wymianą powietrza w pomieszczeniach o oknach wprawdzie o dużo lepszym współczynniku przenikania ciepła, ale niestety zbyt szczelnych.

Sytuację poprawia nieco wietrzenie sal lekcyjnych w czasie przerw (wariant C), przeciętna wymiana powietrza zewnętrznego w salach szkolnych wzrasta wtedy z 0,3 do 0,8 h⁻¹. Należy jednak pamiętać, iż stosowanie wietrzenia wymaga dużej dyscypliny, i w praktyce niestety wykonywane jest bardzo nieregularnie.

Strumień powietrza zewnętrznego, sięgający w czasie wietrzenia ok. 10 h⁻¹, powoduje w okresach niskich wartości temperatury zewnętrznej znaczne obniżenia temperatury wewnętrznej, nawet poniżej 10°C (por. rys. 7), co może być źródłem dużego dyskomfortu w początkowych okresach lekcji. W praktyce w szkołach stosowana jest wentylacja pośrednia pomiędzy wariantem B i C. Z tego powodu wymianie okien towarzyszyć powinna modernizacja systemu wentylacji.

Najtańszym sposobem jest zastosowanie okiennych ciśnienio-

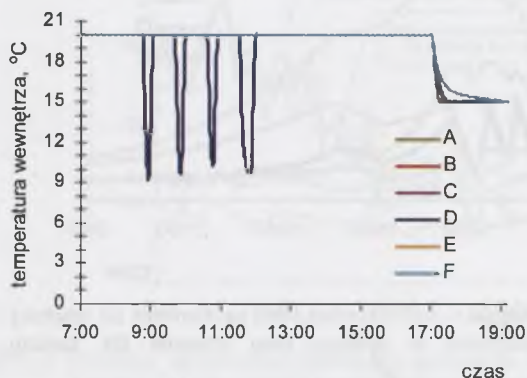
wych nawietrzaków powietrza. W przypadku kiedy współczynnik szczelności okien a zawiera się w granicach 0,5-1,0 m³/(mhdPa^{0,67}), tj. 0,11-0,21 m³/(mhPa^{0,67}), polska norma PN-83/B-03430/Az3:2000 dopuszcza doprowadzenie powietrza wyłącznie przez okna. Jednak ponieważ taka wentylacja okazała się niewystarczająca, sprawdzono jak dodatkowe



Rys. 6. Skumulowany rozkład stężenia CO₂ dla jednej sali we wszystkich rozpatrywanych wariantach

Fig. 6. Cumulative distribution function of CO₂ concentration in single classroom for all cases analysed

rozszczelnienie okien, przez zastosowanie nawiewników, wpłynie na poprawę jakości powietrza.



Rys. 7. Przebieg zmienności temperatury wewnętrznej w sali lekcyjnej w jednym dniu stycznia

Fig. 7. Internal air temperature variation in the classroom in one day of January

grawitacyjnej (wariant E) jest najprostszym sposobem (najmniej inwazyjnym) wprowadzenia wentylacji mechanicznej w istniejącym budynku. Wymiana powietrza w salach lekcyjnych średnio na poziomie $2,6 \text{ h}^{-1}$ daje strumień powietrza przypadający na jednego ucznia w granicach $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Jest to wartość nieco niższa od normowej ($20 \text{ m}^3/\text{h}$), jednak wystarczająca dla utrzymania dobrej jakości powietrza ($S50(\text{sr}) = 990 \text{ ppm}$, $S90(\text{sr}) = 1160 \text{ ppm}$).

Zastosowany system wentylacji mechanicznej pozwolił uzyskać wymaganą jakość powietrza wewnętrznego. Był stosunkowo łatwy w wykonaniu, ale można w nim jednak doszukać się pewnych wad. Rozszczelnienie obudowy okien może powodować wzrost hałasu przenikającego do pomieszczeń i umożliwić napływ zanieczyszczeń pyłowych. Należy się również liczyć z możliwością wystąpienia lokalnych przeciągów spowodowanych bezpośrednim napływem zimnego powietrza do sal szkolnych.

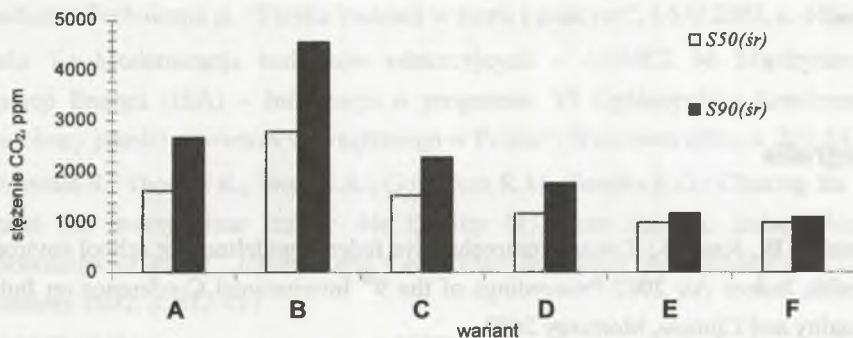
Rozwiązaniem oferującym największą kontrolę nad środowiskiem jest zastosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej. System taki pozwala na skuteczną filtrację powietrza i zastosowanie odzysku ciepła z powietrza usuwanego, co wpływa korzystnie na zmniejszenie zużycia ciepła. Ponieważ omawiana szkoła jest szkołą istniejącą, trudno mówić o zastosowaniu kanałowego rozprowadzenia powietrza z centralnym jego przygotowaniem. Z tego też powodu zaproponowano tu indywidualne systemy z wykorzystaniem kompaktowych central wentylacyjnych, z wyporowym nawiewem powietrza (wariant F) o wydajności sterowanej stężeniem dwutlenku węgla. Wprowadzenie systemu, który uwzględni zmienne obciążenie pomieszczeń, jest źródłem dodatkowych oszczędności energii. Mowa tu o coraz popularniejszym w ostatnim czasie systemie wentylacji DCV (z ang. Demand Controlled Ventilation). System taki gwarantuje stałą

Kryterium jakości powietrza ($S50(\text{sr}) \leq 1000 \text{ ppm}$ i $S90(\text{sr}) \leq 1200 \text{ ppm}$) niestety również w tym przypadku nie zostało spełnione, nawet podczas wietrzenia sal. System taki poprawił wymianę powietrza prawie 4 razy w stosunku do stanu z oknami szczelnymi (por. tab. 1), jest jednak ciągle niewystarczający. Wynika stąd, iż jedynie system wentylacji mechanicznej będzie w stanie zapewnić dobrą jakość powietrza w salach szkolnych.

Montaż wentylatorów dachowych na wylocie z kanałów wentylacji

pokrywanie zapotrzebowania na świeże powietrze, przy minimalnym zużyciu energii przez system wentylacji.

Średni rozkład stężenia dwutlenku węgla (dla dystrybuanty $S50(\bar{s}_r)$ i $S90(\bar{s}_r)$) w salach lekcyjnych dla wszystkich omówionych wariantów wentylacji przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Średnie stężenie dwutlenku węgla w czasie trwania lekcji (netto) w salach lekcyjnych w całym sezonie grzewczym, przy różnych wariantach wentylacji budynku

Fig. 8. CO₂ concentration during lesson (net) for the whole heating season - average in all classrooms for various ventilation systems

Ponieważ w czasie dnia sale charakteryzują się zmiennym obciążeniem, zastosowanie wentylacji mechanicznej ze zmiennym strumieniem powietrza dało dobre wyniki i pozwoliło zmniejszyć średni strumień powietrza nawiewanego (por. tab. 1), przy utrzymaniu tak samo wysokiej jakości powietrza jak w wariancie E.

5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że wentylacja naturalna nie jest w stanie zapewnić właściwej wymiany powietrza. Nawet przy nieszczelnych oknach starego typu stężenie dwutlenku węgla znacznie przekracza 1000 ppm, co potwierdziły zarówno pomiary, jak i symulacja komputerowa. Zamontowanie szczelnych okien powoduje, że wymiana powietrza staje się rażąco niska ($n = 0,3 \text{ h}^{-1}$). Również zastosowanie nawietrzaków nie poprawia sytuacji w wystarczającym stopniu. Regularne wietrzenie sal lekcyjnych w czasie przerw może zmniejszyć stężenie dwutlenku węgla do 2500 ppm, występują wówczas jednak znaczne obniżenia temperatury wewnętrznej sal lekcyjnych (nawet poniżej 10°C).

Dopiero zastosowanie wentylatorów wywiewnych z jednoczesnym zastosowaniem okiennych nawiewników pozwala utrzymać stężenie dwutlenku węgla na średnim poziomie 1000 ppm. Wprawdzie uzyskanie podwyższonej stabilizacji działania wentylacji dokonuje się

dzięki doprowadzeniu dodatkowej energii do napędu wentylatorów, jest to jednak ilość niewielka w porównaniu z kosztem ciepła do ogrzania budynku (maksymalnie 2%).

Jeszcze lepszą kontrolę nad środowiskiem wewnętrznym uzyskamy, stosując system wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła. Zastosowanie wyporowego nawiewu powietrza stwarza dodatkową możliwość poprawy czystości powietrza w strefie oddychania uczniów.

Bibliografia

1. Axelrad B., Jones B.: Toward comprehensive federal guidelines for school environmental health. Indoor Air 2002 Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey 2002.
2. Bakke J.V.: State-of-the-art. report on requirements and recommendations for indoor climate in schools. A report to the Norwegian asthma and allergy association and the Norwegian teachers associations. Indoor Air '99, Proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1, Edinburgh 1999, p. 516-321.
3. Carrer P., Bruinen D.E., Bruin Y., Franchi M., Valovirta E.: The EFA project: indoor air quality in European schools. Indoor Air 2002 Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey 2002.
4. Daisey J.M., Angell W.J.: Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. Indoor Air '99 Proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 2, Edinburgh 1999, p. 1-6.
5. Dols W.S., Walton G.N.: CONTAM 2.0. User Manual, Multizone Airflow and Contaminant Transport Analysis Software. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6921 Gaithersburg, USA 2002.
6. Feola J., Hiester M., Mcguinness M.: IAQ tools for schools network: an innovative approach to achieving good IAQ. Indoor Air 2002 Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey 2002.
7. Gierczycka E., Ferdyn-Grygierek J.: Wykorzystanie wytwarzanego metabolicznie dwutlenku węgla do określania wymiany powietrza w pomieszczeniu. VIII Ogólnopolskie Seminarium pt., „Zastosowanie mechaniki płynów w ochronie środowiska”, Wisła 2003, s. 245-254.
8. Hanssen S.O.: Increased ventilation reduces general symptoms but not sensory reactions. Indoor Air '93 Proceedings of 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 5, Helsinki 1993, p. 33-38.

9. Jędrzejewska-Ścibak T.: Jakość powietrza w budynkach szkolnych w Polsce – wymagania prawne oraz zakres odpowiedzialności za ich realizację. VI Ogólnopolska Konferencja pt. „Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce”, Warszawa 2001, s. 147-157.
10. Lis A.: Komfort cieplny dzieci i dorosłych w pomieszczeniach. IX Konferencja Naukowo-Techniczna pt. ”Fizyka budowli w teorii i praktyce”, Łódź 2003, s. 445-451.
11. Mróz T.: Modernizacja budynków edukacyjnych – ANNEX 36 Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) – Informacja o programie. VI Ogólnopolska Konferencja pt. „Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce”, Warszawa 2001, s. 237-243.
12. Petronella S., Thomas R., Stone J.A., Goldblum R.M., Brooks E.G.: Clearing the Air: A Model for Investigation Indoor Air Quality in Texas Schools. Indoor Air 2002 Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey 2002, p. 812-817.
13. PN-83/B-03430 (wraz ze zmianą Az3:2000) – Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej.
14. Recknagel H., Sprenger E., Hönnmann W., Schramek R.: Poradnik. Ogrzewanie i klimatyzacja. EWFE, Gdańsk 1994.
15. Savenstrand I., Falck E., Hult M., Bakke J.V.: Guidelines for indoor air quality in schools – creation of healthy indoor environment. Indoor Air '99, Proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1, Edinburgh 1999, p. 570-575.
16. Smedje G., Norback D., Edling C.: Mental Performance by Secondary School Pupils in Relation to the Quality of Indoor Air. Indoor Air '96 Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1, Nagoya, Japan 1996, p. 413-418.
17. Sowa J., Bartkiewicz P.: Stężenie dwutlenku węgla jako źródło informacji o jakości powietrza w pomieszczeniach. VI Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Fizyka budowli w teorii i praktyce”, Łódź 1997, s. 336-345.
18. Sowa J.: Ocena intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach na podstawie interpretacji zmian stężenia dwutlenku węgla. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska, z. 31, Warszawa 1999, s. 23-46.
19. Sowa J.: Jakość środowiska w budynkach szkolnych – wymagania a rzeczywistość. International Conference Problems of Environment Engineering at the Threshold of the New Millennium, Wrocław – Szklarska Poręba 2000, s. 635-640.

20. Sowa J.: Wentylacja klas szkolnych – efektywność stosowanych rozwiązań oraz możliwości ich usprawnienia. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Fizyka budowlanej w teorii i praktyce”, Łódź 2001, s. 545-554.
21. Sowa J.: Wentylacja a jakość powietrza w budynkach szkolnych. COW, nr 3/2002, s. 24-29.
22. Wheeler A.: System selection. ASHRAE Journal, June 1998, p. 12-16.

Recenzent: Dr inż. Jerzy Sowa