



RAPORT STANOWIĄCY PRZEGLĄD
LITERATURY W ZAKRESIE
DOTYCHCZAS PRZEPROWADZONYCH
BADAŃ W SZKOŁACH NA TERENIE
POLSKI POD KĄTEM STĘŻENIA
DWUTLENKU WĘGLA

Autor:
dr inż. Sławomira Dumala

styczeń 2023

1. Wstęp

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) powietrze wewnętrzne ma większy wpływ na nasze zdrowie i samopoczucie niż powietrze zewnętrzne. Wynika to z jednej strony z czasu jaki człowiek przebywa w pomieszczeniach (prawie 90% życia), z drugiej z koncentracji zanieczyszczeń w ograniczonej przestrzeni. Ponieważ wiele zrobiono aby zmniejszyć emisję szkodliwych substancji do atmosfery, w pomieszczeniach zamkniętych stężenia wielu z nich są obecnie wyższe niż w powietrzu zewnętrznym.

Narażenie na szkodliwe substancje jest szczególnie istotne dla organizmów młodych, a młodzież szkolna często spędza w klasach szkolnych ponad 8 godzin dziennie (jedną trzecią czasu). Wieloletnie badania udowodniły, że jakość powietrza wewnętrznego ma istotny wpływ nie tylko na zdrowie użytkowników, ale także na łatwość przyswajania wiedzy, zapamiętywania i ogólne samopoczucie.

W Polsce przeważająca liczba obiektów edukacyjnych to budynki z lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych, poddane w ostatnich latach różnego rodzaju remontom. W ich ramach podejmowano często działania zmierzające do ograniczenia zużycia energii, głównie poprzez modernizację instalacji centralnego ogrzewania i węzłów cieplnych, ocieplanie przegród budowlanych i wymianę stolarki okiennej.

Działanie związane z ograniczaniem zużycia energii wymuszone są również przez obowiązujące akty prawne. Od stycznia 2017 r. wartości dopuszczalnych wskaźników zużycia energii EP dla nowobudowanych budynków oraz niektórych współczynników przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych budynków uległy zmianie, zgodnie z nowelizacją rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, które weszło w życie 1 stycznia 2014 r. Rozwiązanie to ma na celu wypełnienie postanowień art. 9 ust. 1 dyrektywy w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, zgodnie z którym do dnia 31 grudnia 2020 r. wszystkie nowe budynki powinny być budynkami o niemal zerowym zużyciu energii oraz po dniu 31 grudnia 2018 r. nowe budynki zajmowane przez władze publiczne oraz będące ich własnością (w tym szkoły) były budynkami o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB). Powołując się na art. 2 pkt 2 dyrektywy EPBD Recast, przez budynek nZEB należy rozumieć budynek o niskim zapotrzebowaniu na nieodnawialną energię pierwotną i z wysokim stopniem wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych.

Przykładowo w Polsce budynek szkolny nZEB powinien mieć wskaźnik EP na poziomie 45 kWh/m²/rok (tab. 1) oraz współczynniki przenikania ciepła przegród budowlanych zgodnie z danymi zestawionymi w warunkach technicznych (tab. 2).

Tab. 1. Wymagania stawiane budynkom nowoprojektowanym

Wymagania obowiązujące w roku		2017 EP _{H+W} [W/m ² K]	2021 EP _{H+W} [W/m ² K]	
Przeznaczenie budynku	Mieszkalny jednorodzinny	95	70	
	Mieszkalny wielorodzinny	85	65	
	Zamieszkania zbiorowego	85	75	
	Użyteczności publicznej	Opieki zdrowotnej	290	190
		pozostałe	60	45
Budynki gospodarcze, produkcyjne, magazynowe		90	70	

Tab. 2. Współczynniki przenikania ciepła U W/(m²K) dla wybranych przegród budowlanych

Element budynku	Współczynnik przenikania ciepła dla wybranego elementu budynku U W/(m ² K)
	od 01.01.2021
Ściana zewnętrzna t _i ≥ 16°C	0,20
Podłoga	0,30
Dach/stropodach t _i ≥ 16°C	0,15
Okno t _i ≥ 16°C	0,90
Drzwi	1,30

Ponadto zgodnie z art. 39 ust. 2 ustawy o charakterystyce energetycznej budynków oraz art. 9 ust. 3 dyrektywy załącznik nr 1 do uchwały zawiera również działania administracji rządowej podejmowane w celu promowania budynków o niskim zużyciu energii, w tym w zakresie projektowania, budowy i przebudowy budynków w sposób zapewniający ich energooszczędność.

Niestety bardzo często podejmowane czynności naprawcze powodują pogorszenie parametrów powietrza wewnętrznego.

Własne wstępne badania wskazują na niezadowalającą jakość powietrza w placówkach edukacyjnych w Lublinie niezależnie od podjętych czynności modernizacyjnych. Podobną sytuację stwierdzono w wielu innych krajach (Belgia, Dania, USA, Kanada).

Większość szkół w naszym kraju to budynki dwukondygnacyjne posiadające wentylację grawitacyjną i tradycyjny system ogrzewania oparty na grzejnikach płytowych. Wysokość kanałów wentylacji grawitacyjnej, szczególnie dla wyższej kondygnacji, jest bardzo mała (1-2 m) co powoduje, że w okresach bezwietrznych, wartość ciśnienia czynnego powodującego przepływ powietrza jest niewielka i uniemożliwia napływ powietrza do pomieszczenia. Ponadto bardzo często nie ma możliwości przebudowy systemu wentylacji bez znacznej ingerencji w konstrukcję budynku lub jest to wręcz niemożliwe.

Raporty medyczne wykazują nieustanny wzrost liczby alergików. Szacuje się, że obecnie co piąta osoba ma katar sienny, co piąte dziecko w wieku szkolnym ma astmę, co szóste - choruje na alergiczne zmiany skórne, co dwudziesta osoba ma napady pokrzywki.

Jakość powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach zależy od właściwości aerozoli w nim występujących. Na jakość powietrza wewnętrznego może mieć wpływ ilościowa i masowa koncentracja, skład granulometryczny, skład chemiczny i biologiczny cząstek aerozolowych. Właściwości fizyczne aerozoli decydują również o dynamice rozprzestrzeniania się aerozoli w pomieszczeniach, jak również o miejscu deponowania cząstek aerozolowych w układzie oddechowym człowieka.

Przy każdym wdechu jesteśmy narażeni na inhalację aerozoli, ponieważ stanowią one od 5 do 34% zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego. Szczególnym zagrożeniem są cząsteczki, których wielkość nie przekracza 7 μm , czyli te zaliczane do frakcji wdychanej. Przy czym cząstki o średnicy 4,7-7 μm osadzają się w gardle, 3,3-4,7 μm docierają do tchawicy i oskrzeli pierwszorzędowych, 1,1-3,3 μm mogą przedostać się do oskrzeli drugorzędowych i końcowych, a te poniżej 1,1 μm do oskrzelików płucnych. Za najbardziej niebezpieczne uważa się cząstki o rozmiarze mniejszym niż 2,5 μm (Górny, 2004b; Stetzenbach i in., 2004).

Według PN:EN wśród cząstek aerozolowych możemy wyróżnić:

- **Frakcję pozatchawiczną** – udział masowy cząstek frakcji wdychanej nie wnikających poza krtań (PN-EN481:1998);
- **Frakcję tchawiczną** – udział masowy cząstek frakcji wdychanych wnikających poza krtań (PN-EN 12792:2006);
- **Frakcję tchawiczno-oskrzelową** – udział masowy cząstek frakcji wnikających głębiej poprzez krtań, lecz nie dostających się do bezręskowych dróg oddechowych (PN-EN 12792:2006);
- **Frakcję respirabilną** – frakcja aerozolu wnikająca do dróg oddechowych, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze wymiany gazowej (PN-EN 12792:2006);
- **Frakcję torakalną** – frakcja aerozolu wnikająca do dróg oddechowych w obrębie klatki piersiowej, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze tchawiczno-oskrzelowym i obszarze wymiany gazowej (PN-EN 12792:2006);
- **Frakcję wdychaną cząstek** – frakcja wdychana, która stanowi frakcję masową wszystkich zawieszonych w powietrzu cząstek i która jest wdychana przez nos i usta (PN-EN 14031:2006).

W przypadku CO₂ obowiązuje PN-EN 16798-1:2019-06 (tab. 3):

Tab. 3. Wymagania normatywne w zakresie wartości projektowych parametrów powietrza, czystości powietrza wg PN-EN 16798-1:2019-06

Kategoria jakości środowiska wewnętrznego (poziom wymagań)	Prędkość powietrza [m/s]		Stężenie CO ₂ [ppm]	Strumień powietrza zewnętrznego [m ³ /(h•os)]/komfort		
	sezon chłodniczy	sezon grzewczy	powyżej stężenia CO ₂ w powietrzu zewnętrznym ²	higieniczny	całkowity ³	oczekiwany odsetek osób niezadowolonych z jakości powietrza [%]
I – wysoki	0,12 ¹	0,1	550	36	72	15
II – średni	0,19 ¹	0,16	800	25,2	50,4	20
III – umiarkowany	0,24 ¹	0,21	1350	14,4	28,8	30
IV – niski	brak zaleceń	brak zaleceń	>1350	9	19,8	40

¹ Gdy temperatura powietrza jest wyższa od 25°C, dopuszcza się wyższą maksymalną prędkość powietrza pod warunkiem, że użytkownicy mogą kontrolować prędkość powietrza.

² Stężenie CO₂ określone dla osób niezaadaptowanych; strumień powietrza zewnętrznego dostarczany dla każdego z użytkowników.

³ Całkowity strumień powietrza zewnętrznego uwzględnia minimalny strumień higieniczny i strumień powietrza wynikający z emisyjności budynku; w ostatniej kolumnie podano wartości dla budynku niskoemisyjnego; przyjęto 10 m² podłogi jako powierzchnię przypadającą na 1 użytkownika.

Przepisy, normy i rozporządzenia obowiązujące lub zalecane w różnych krajach wskazują dwutlenku węgla jako wskaźnik jakości powietrza w pomieszczeniach. Uznaje się powszechnie, że kontrolowanie i rozcieńczanie CO₂ pozwoli na zachowanie odpowiedniego mikroklimatu wolnego od nadmiernych ilości zanieczyszczeń gazowych czy pyłowych.

Stężenie CO₂ jest uznawane za wskaźnik intensywności wentylacji. Jego wartość w pomieszczeniach zależy od jego wartości w otoczeniu zewnętrznym i emisji CO₂ z wewnętrznych źródeł. Ponadto jest istotną informacją przy określaniu jakości powietrza wewnętrznego.

Badania wykazują, że występujące w szkołach rozwiązania grawitacyjnych systemów wentylacyjnych są niedostosowane do ich struktury i sposobów użytkowania. Działanie kanałów wentylacyjnych jest przypadkowe i w znacznym stopniu zależy od warunków pogodowych oraz szczelności okien. Powszechna zamiana na okna o dużej szczelności powoduje, że przepływy powietrza są minimalne, a wymiana powietrza jest bliska zeru, co jest jedną z głównych przyczyn występowania w pomieszczeniach nadmiernych stężeń różnych substancji zanieczyszczających, a także negatywnego odbioru warunków wewnętrznych przez użytkowników. Sytuacja jest niepokojąca, bo dotychczas prowadzone badania potwierdzają niezadowalającą jakość powietrza w budynkach edukacyjnych.

Poniżej zestawiono wyniki badań zrealizowanych na terenie Polski w latach 2000-2020, które potwierdzają zły stan powietrza wewnętrznego w placówkach edukacyjnych (tab. 5).

Tab. 5. Zestawienie wyników badań zrealizowanych na terenie Polski w latach 2000-2020

Autor/Tytuł/Czasopismo	Jerzy Sowa Air quality and ventilation rates in schools in Poland - requirements, reality and possible improvements, Proceedings: Indoor Air 2002
Rok badania	2000
Miasto	Warszawa
Obiekt badania	16 sal lekcyjnych w szkołach podstawowych, 4 sale lekcyjne w gimnazjach i 8 sal lekcyjnych w szkołach ponadgimnazjalnych. Powierzchnia tych pomieszczeń wahała się od 43 m ² do około 74 m ² , a wysokość od 2,7 m do 4 m.
Liczba użytkowników	22-44
Czas pomiarów	Luty, marzec 2000 r.; pomiar automatyczny z interwałem 1 min (poniedziałek rano -piątek po południu)
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Brak informacji
Stężenie CO₂	Praktycznie przez cały okres użytkowania sali stężenie CO ₂ przekraczało 1000 ppm. Max 4000-4200 ppm. Z wykresu zamieszczonego w publikacji wynika, że przez większą część dnia stężenia CO ₂ było wyższe niż 2000 ppm (w większości przypadków powyżej 3000 ppm).
Autor/Tytuł/Czasopismo	Joanna Ferdyn-Grygierek Jakość powietrza i wentylacja w budynkach edukacyjnych, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej (2008) Seria: Architektura z. 47, Nr kol. 1787
Rok badania	2008
Miasto	brak informacji
Obiekt badania	budynek szkoły podstawowej, 3-kondygnacyjny, wolnostojący, oddany do eksploatacji w latach 60. XX w.
Liczba użytkowników	Brak informacji
Czas pomiarów	Styczeń – badania w obiekcie, od października do kwietnia – symulacje wariantów
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	miernik/rejestrator parametrów środowiska wewnętrznego PS 30
Stężenie CO₂	Przed wymianą okien stężenie dwutlenku węgla przekraczało 3000 ppm (średnio 1640 ppm) , po wymianie okien osiągało maksymalnie 6000 ppm (średnio 2800 ppm) . Wniosek z przeprowadzonych badań: wymianie okien towarzyszyć powinna modernizacja systemu wentylacji. W pracy potwierdzono również, że wietrzenie nie jest sposobem na uzyskanie zalecanych parametrów powietrza, jedynie wentylacja mechaniczna pozwoliła uzyskać wymaganą jakość powietrza wewnętrznego.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk Analysis of stack ventilation system effectiveness in an average kindergarten in north-eastern Poland, Energy and Buildings 43 (2011) 2488–2493
Rok badania	2010

Miasto	Białystok
Obiekt badania	Przedszkole - budynek wolnostojący, wybudowany w latach 70-tych, modernizowany w 2007 - ocieplenie zewnętrzne ścian wraz z montażem szczelnej stolarki okiennej, kubatura sal ok. 210 m ³
Liczba użytkowników	Brak informacji
Czas pomiarów	8:00-12:00 czerwiec, wrzesień, listopad, kilka pomiarów w lutym
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Miernik Testo 435-4 +0 i +10000 ppm CO ₂ :±100 ppm CO ₂ lub ±3% przy stężeniu poniżej 100 ppm;
Stężenie CO₂	Stężenie dwutlenku węgla wyniosło 800-1700 ppm wg wykresu dziennego (w godzinach 8:00 - 12:00), a 352-555 ppm wg zestawienia tabelarycznego. Podczas badania okna były przeważnie nie zamknięte – wzrost wskaźnika wymiany powietrza przy niezamkniętych lub rozszczelnionych oknach osiągał 11,4% - 30,1%. Ponadto sale lekcyjne są codziennie rutynowo poddawane intensywnemu wietrzeniu 10 -15 min bez względu na warunki pogodowe, za każdym razem, gdy dzieci opuszczają klasę. Dodatkowo (w dzień i w nocy) wszystkie okna były rozszczelnione. W artykule odwołano się do prac Wargockiego, który odnotował stężenie CO ₂ w polskich przedszkolach pomiędzy 1000 – 4200 ppm
Autor/Tytuł/Czasopismo	Bernard Poędnik Particulate matter and student exposure in school classrooms in Lublin, Poland, Environmental Research120 (2013) 134–139
Rok badania	2013
Miasto	Lublin
Obiekt badania	3 szkoły średnie; Sale lekcyjne zlokalizowane na różnych piętrach, o różnych powierzchniach (od 29 do 71 m ²) oraz kubaturze (od 96 do 250m ³)
Liczba użytkowników	Obłożenie mieściło się w przedziale od 18 do 34 uczniów
Czas pomiarów	2 dni
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Czujniki GMD/W20 VAISALA - umieszczony w pustych ławkach pośrodku klasy na wysokości 110 cm
Stężenie CO₂	Uzyskano stężenie max. 1500 ppm (brak informacji o liczbie użytkowników dla tego odczytu)
Autor/Tytuł/Czasopismo	D.A. Krawczyk, A. Roderob, K. Gładyszewska-Fiedoruka, A. Gajewski CO ₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations, Energy and Buildings 129 (2016) 491–498
Rok badania	2016 – badania modelowe zweryfikowano na podstawie wyników pomiarów.
Miasto	Białystok
Obiekt badania	Politechnika Białostocka (rok budowy 1988), 4 klasy od 100 – 416 m ³
Liczba użytkowników	12-70 osób
Czas pomiarów	wrzesień
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Miernik Testo 435-4; od +0 do +5000 ppm dokładność ±50 ppm (±2%); od 5000 ppm do 10000 ppm dokładność ±100 ppm (±3%);
Stężenie CO₂	Od 700 do 2200 ppm – pomiar z jednej godziny lekcyjnej w 4 salach.

	<p>Po 20 minutach we wszystkich klasach (pomiar rzeczywisty) odnotowano powyżej 1000 ppm.</p> <p>W badaniach modelowych w ciągu pierwszych 45 minut stężenie dwutlenku węgla byłoby wyższe niż 1000 ppm, przez pierwsze 35 minut spełniałoby wymogi IDA2. W przypadku pełnego obsadzenia miejsc (tak jak zaprojektowano sale dydaktyczne) we wszystkich salach stężenie CO₂ przekroczyłoby 1000 ppm po pierwszych 30 min.</p>
Autor/Tytuł/Czasopismo	<p>Anna Mainka, Elwira Zajusz-Zubek Indoor Air Quality in Urban and Rural Preschools in Upper Silesia, Poland: Particulate Matter and Carbon Dioxide, International Journal of Environmental Research and Public Health 12 (2015) 7697-7711</p>
Rok badania	2013/2014
Miasto	Gliwice
Obiekt badania	Cztery przedszkola; dwa przedszkola zlokalizowane na terenie miejskim, a dwa na terenach wiejskich - wszystkie zostały poddane procesowi termomodernizacji
Liczba użytkowników	w każdej grupie było 21–25 dzieci i 1–2 osoby z kadry przedszkola
Czas pomiarów	sezon zimowy
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	77535, Az Instruments International Ltd., Hongkong; od +0 do +10 000 ppm CO ₂ : ±100 ppm CO ₂ lub ±3% przy stężeniu poniżej 100 ppm.
Stężenie CO₂	<p>IDA4 (91,0% obowiązkowej opieki/czasu nauczania) panował w klasie dzieci młodszych, gdzie dzieci spały w tej samej sali, w której odbywały się pozostałe czynności. Najniższy wynik IDA4 = 22,6% odnotowano dla klas dzieci młodszych, gdzie dzieci odpoczywały w innym pomieszczeniu.</p> <p>Wyniki wykazały różnice między klasami dzieci starszych i młodszych, które mogą stać się bardziej znaczące, jeśli połączymy informacje o wentylacji z różnymi wzorcami sposobów eksploatacji sal.</p>
Autor/Tytuł/Czasopismo	<p>Anna Mainka, Elwira Zajusz-Zubek, Barbara Kozielska, Ewa Brągoszewska Badanie zanieczyszczeń powietrza oddziałujących na dzieci w przedszkolu miejskim zlokalizowanym przy drodze o dużym natężeniu ruchu, Inżynieria i Ochrona Środowiska (2015), t. 18 (1), s. 119-133</p>
Rok badania	2014
Miasto	Centrum Gliwic
Obiekt badania	Budynek przedszkola jednopiętrowy, podpiwniczony, zlokalizowany przy ulicy o dużym natężeniu ruchu, wybrano dwie sale o kubaturze 210 m ³
Liczba użytkowników	25 dzieci plus 1-2 opiekunów
Czas pomiarów	7 do 17 stycznia, 6:30 do 16:30
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Czujniki CO ₂ model 77535 (producent AzInstruments) posiadające sensor absorpcji promieniowania podczerwonego i umożliwiają pomiar stężenia CO ₂ w zakresie od 0 do 10 000 ppm (dokładność ±5%)
Stężenie CO₂	W czasie przebywania dzieci w salach powietrze wewnątrz pomieszczeń było przede wszystkim niskiej jakości - WEW4 (ΔCO₂ > 1000 ppm, czyli >1400 ppm).
Autor/Tytuł/Czasopismo	Robert Cichowicz, Anna Gawron-Skarbek, Małgorzata Godala, Ewa Zimna-Walendzik, Henryk Sabiniak, Franciszek Szatko

	Ocena stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wybranych pomieszczeń uczelni wyższej, Prob Hig Epidemiol, 2014 95(2):287-291
Rok badania	2014
Miasto	Łódź
Obiekt badania	Stężenie CO ₂ mierzono w wylosowanych pomieszczeniach budynku Politechniki Łódzkiej, w których prowadzone są zajęcia ze studentami (sala komputerowa, audytorium, pokój wykładowcy)
Liczba użytkowników	Zależna od przeznaczenia sali
Czas pomiarów	Dynamikę zmiany stężenia CO ₂ prowadzono w czasie 45 minut, ponawiając kolejny pomiar co 3 minuty.
Wentylacja	Mechaniczna – wyłączona podczas pomiaru
Urządzenie pomiarowe CO ₂	Analizę przeprowadzono za pomocą mikrochromatografu gazowego
Stężenie CO ₂	Stężenie CO ₂ w powietrzu trzech badanych audytoriów znacząco przekraczało dopuszczalne wartości dla pomieszczeń zamkniętych już podczas pierwszej godziny zajęć/pomiaru, osiągając najwyższe wartości CO ₂ na poziomie: 1 298 ppm dla audytorium o większej kubaturze (825 m ³ , w obecności 18 osób wewnątrz sali) oraz 6 689 i 3 006 ppm dla dwóch mniejszych audytoriów (690 m ³ , w obecności odpowiednio: 83 i 44 osób). Podczas zajęć w pracowni komputerowej (125 m ³ , 17 osób) stężenie CO ₂ osiągnęło 951 ppm już w 23 minucie pomiaru. Również rutynowy pomiar w pokoju wykładowcy wykazał przekroczenie wartości minimum higienicznego, wynosząc 1 146 ppm.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Marek Telejko Attempt to improve indoor air quality in computer laboratories, Procedia Engineering 172 (2017) 1154 – 1160
Rok badania	Pomiędzy listopadem 2014 a lutym 2015 r.
Miasto	Brak informacji – prawdopodobnie Kielce, ponieważ autor jest pracownikiem Politechniki Kieleckiej
Obiekt badania	Sześć laboratoriów komputerowych zlokalizowanych w liceach wybudowanych w latach 1975-1991
Liczba użytkowników	Brak informacji
Czas pomiarów	Pomiary prowadzono trzy miesiące, po 2 tygodnie w każdym z nich. Pomiar ciągły w pięciominutowych odstępach. Dla każdego pomieszczenia wykonano trzy serie pomiarowe.
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO ₂	Brak informacji
Stężenie CO ₂	Najniższe stężenia CO ₂ , od 419 ppm do 517 ppm, odnotowano w nocy lub we wczesnych godzinach porannych. Podczas dnia wartości szybko rosły, przekraczając w niektórych przypadkach 3200 ppm . Zalecane poziomy były przekroczone przez cały okres użytkowania. Poprzez dwukrotne zwiększenie napływu powietrza (z 90 m ³ /h do 180 m ³ /h) max. poziom stężenia CO ₂ z 3260 ppm został obniżony do 2184 ppm.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Robert Cichowicz, Henryk Sabiniak, Grzegorz Wielgosiński 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
Rok badania	2015
Miasto	Łódź

Obiekt badania	Wydział Inżynierii Lądowej, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej - aula położona na I piętrze o powierzchni 97,8 m ² i kubaturze 390 m ³
Liczba użytkowników	84, 45 lub 18 uczniów wraz z nauczycielem i osobą dokonującą pomiarów (wentylacja wyłączona) lub 102, 59, 54 uczniów wraz z nauczycielem i osobą dokonującą pomiarów (wentylacja włączona)
Czas pomiarów	Wg planu zajęć studentów
Wentylacja	Mechaniczna włączana i wyłączana na potrzeby eksperymentu
Urządzenie pomiarowe CO₂	Mikrochromatograf VEGA-GC produkcji włoskiej firmy POLLUTION
Stężenie CO₂	Poziom stężenia CO ₂ przy 84 osobach na sali po pierwszych 4 minutach od rozpoczęcia zajęć wyniosło 4909,62 ppm . Następnie wartości wzrastały, osiągając po 31 minutach poziom 6449,30 ppm (ze względu na poziom CO ₂ pomiary przerwano). Podczas tej serii pomiarów studenci brali bardzo aktywny udział w zajęciach. Następny wykonywano serie dla 45 i 18 osób na sali. U 45 osób po 10 minutach od rozpoczęcia zajęć poziom stężenia CO ₂ wyniósł 2281,99 ppm , a po około 45 minut było to 3249,42 ppm . II seria z wyłączoną wentylacją - dla 84 osób wyniki pomiarów zaczęły rosnąć od 5697,43 do 6688,96 ppm po 33 minutach , a następnie ze względu na poziom stężenia CO ₂ zostały zatrzymane. W kolejnej serii pomiarów, przy 45 osobach, mieściły się one w przedziale 1711,63 i 2624,72 ppm po 35 minutach , natomiast w ostatniej serii pomiary wartości mieściły się w przedziale od 801,88 do 1298,04 ppm po 33 minutach . Przy włączonej wentylacji odnotowano powyżej 1000 ppm ale po ponad 60 minutach.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Maciej Mijakowski, Jerzy Sowa An attempt to improve indoor environment by installing humidity sensitive air inlets in a naturally ventilated kindergarten building, Building and Environment 111 (2017) 180-191
Rok badania	2016/2017
Miasto	Warszawa
Obiekt badania	Przedszkole, powierzchnia 35,4 m ² , kubatura 138,8 m ³
Liczba użytkowników	20 dzieci, 2 nauczycieli
Czas pomiarów	Od 27 listopada do 20 grudnia, od 05 marca do 28 marca
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Miernik Testo 435
Stężenie CO₂	Max. 5000 ppm (1 seria), max. 4000 ppm (2 seria) Limit 1000 ppm CO ₂ został spełniony dla mniej niż 10% czasu użytkowania przed instalacją nawiewników higrosterowanych oraz ok. 20% czasu po ich instalacji.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Anna Mainka, Elwira Zajusz-Zubek, Barbara Kozielska, Ewa Brągoszewska Investigation of air pollutants in rural nursery school – a case study, Air Protection in Theory and Practice, E3S Web of Conferences 28, 01022 (2018)
Rok badania	2016
Miasto	Okolice Gliwic

Obiekt badania	wiejskie przedszkole położone około 10 km na północ od miasta Gliwice, termomodernizowane w 2013
Liczba użytkowników	14-18
Czas pomiarów	Wiosna, zima
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Czujnik CO ₂ model 77535 (AZ Instruments) w zakresie od 0 do 10 000 ppm (dokładność ok ±5%)
Stężenie CO₂	Podczas zajęć opiekuńczo-wychowawczych powietrze w salach lekcyjnych było często niskiej jakości (IDA4). Najwyższy udział IDA4 (60,0% obowiązkowej opieki/czasu dydaktycznego) dominował w klasie młodszych dzieci. Najwyższe stężenie CO ₂ zaobserwowano w klasie dzieci młodszych, które spały w godzinach popołudniowych.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Anna Mainka, Elwira Zajusz-Zubek Determination on Carbon Dioxide Levels in School Buildings: the Effect of Thermal Efficiency Improvement; Engineering and Protection of Environment 21(2) (2018) 155-162
Rok badania	2016
Miasto	Ziemięcice, Przeźchleb
Obiekt badania	Do badań wybrano dwa budynki szkolne. Obie szkoły mieszczą się w ponad 100-letnich budynkach. Szkołę podstawową w Ziemięcicach oddano do użytku w 1874 r. (termomodernizowano w 2011), natomiast szkołę w Przeźchlebiu w 1884 r. (brak termomodernizacji). Są to typowe szkoły wiejskie z regionu Górnego Śląska, zbudowane z cegły przed II wojną światową.
Liczba użytkowników	Liczba dzieci w klasach w obu szkołach nie przekraczała 14.
Czas pomiarów	Kwiecień-czerwiec
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Czujnik CO ₂ model 77535 (AZ Instruments) w zakresie od 0 do 10 000 ppm (dokładność ok ±5%)
Stężenie CO₂	Średnie stężenia dwutlenku węgla w salach szkolnych w budynkach po termomodernizacji (WTM) były wyższe od stężeń obserwowanych w szkole niepoddanej termomodernizacji (NTM). Stężenia CO ₂ wahały się od 1287 ±333 ppm do 2146 ±386 ppm oraz od 936 ±196 ppm do 1878 ±567 ppm odpowiednio w budynkach szkolnych WTM i NTM (max. 3235 ppm) Wyniki jednoznacznie wskazują na częstsze występowanie złej jakości powietrza (do 70% czasu w ciągu roku) w termomodernizowanym budynku szkolnym w porównaniu z budynkiem bez termomodernizacji (do 52% czasu). Porównanie poszczególnych pomieszczeń w obu szkołach (bez termomodernizacji i po termomodernizacji) wykazało niską jakość powietrza we wszystkich pomieszczeniach po termomodernizacji (IDA 4). W przypadku szkoły WTM dominowała niska jakość powietrza w pomieszczeniach (> 70%), w klasach gdzie uczniowie nie wychodzili na korytarze podczas przerw. W szkole NTM jakość powietrza w pomieszczeniach była niska w klasach 3-6. Były to klasy o najmniejszej kubaturze oraz sale komputerowe. W pozostałych pomieszczeniach szkoły NTM jakość powietrza w pomieszczeniach wahała się od IDA 1 do IDA 3. Uzyskane wyniki badań wykazały, że termomodernizacja starych budynków prowadzi do pogorszenia jakości powietrza w

	pomieszczeniach, co potwierdził wysoki poziom stężenia CO ₂ .
Autor/Tytuł/Czasopismo	Małgorzata Basińska, Michał Michałekiewicz, Katarzyna Ratajczak Impact of physical and microbiological parameters on proper indoor air quality in nursery, Environment International 132 (2019) 105098
Rok badania	2017/20018
Miasto	Poznań
Obiekt badania	wybrane pomieszczenia żłobka w budynku bliźniaczym wybudowany w latach 1978-80, powierzchnia od 16 m ² do 68,9 m ² , kubatura 40 m ³ – 172 m ³
Liczba użytkowników	11–15 dzieci w wieku 1,5 – 3 lata
Czas pomiarów	od 20 listopada 2017 do 16 kwietnia 2018
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	rejestrator jakości powietrza IAQ HD21ABE17 z dokładnością ±50 ppm dla dwutlenku węgla
Stężenie CO₂	Średnio od 1157 ppm do max. 3951 ppm
Autor/Tytuł/Czasopismo	Ewa Zender - Swiercz, Marek Telejko Indoor Air Quality in Kindergartens in Poland, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 471 (2019) 092066
Rok badania	od stycznia do marca 2015 r
Miasto	Miasto na terenie Polski liczące ok. 200 tys. mieszkańców; Brak informacji – prawdopodobnie Kielce, ponieważ autorzy są pracownikami Politechniki Kieleckiej
Obiekt badania	Cztery przedszkola zlokalizowane w Polsce, w mieście liczącym 200 tys. mieszkańców. Budynki powstały w latach 1980-1995. W ostatnich latach przeszły termomodernizację.
Liczba użytkowników	14-19
Czas pomiarów	Pomiary wykonywano przez 3 miesiące w okresach dwutygodniowych z krokiem pomiarowym 5 minut. Wykonano 2 serie pomiarów dla każdego lokalu.
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Brak informacji
Stężenie CO₂	Najniższe wartości stężenia dwutlenku węgla notowano w nocy lub we wczesnych godzinach porannych - od 452 ppm do 539 ppm, co w przybliżeniu odpowiadało wartości w powietrzu zewnętrznym. W czasie przebywania dzieci na terenie obiektu stężenie CO ₂ szybko rosło i osiągało prawie 4500 ppm . Stężenia powyżej zalecanego 750 ppm występowały niemal przez cały okres użytkowania pomieszczeń. Krótkoterminowe (do 5 minut) wietrzenie nie przyniosło żadnego widocznego efektu.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Jerzy Sowa, Justyna Noga-Zygmunt, Joanna Ugorowska Ocena parametrów powietrza wewnętrznego w budynku wyższej uczelni przed przewidywaną modernizacją do standardu niemal zero energetycznego, Fizyka budowli w teorii i praktyce tom IX, nr 3 – 2017
Rok badania	2017
Miasto	Warszawa
Obiekt badania	Pomiary przeprowadzone w 32 pomieszczeniach o różnym przeznaczeniu (ok. 20% z 163 pomieszczeń, w których realizowany jest proces nauczania) – gmach Wydziału Instalacji Budowlanych,

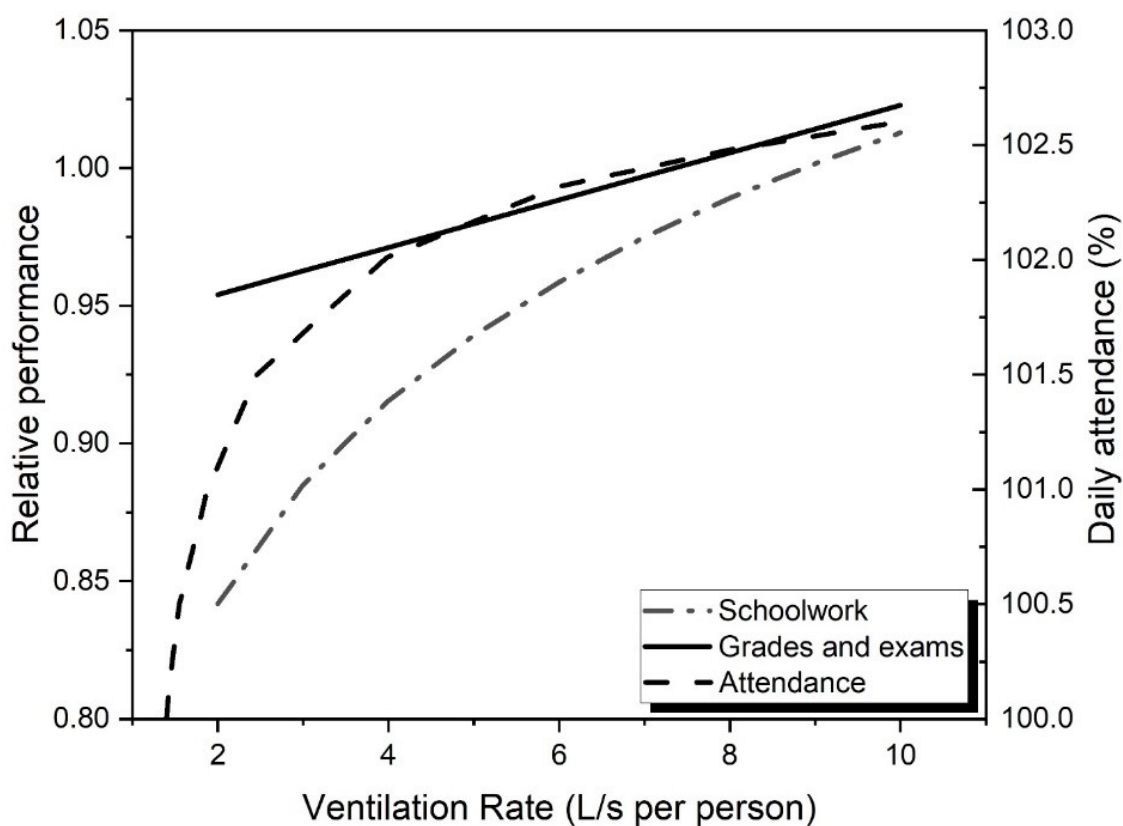
	Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej wzniesiony w latach siedemdziesiątych XX w.
Liczba użytkowników	W zależności od przeznaczenia sali; Liczbę użytkowników szacuje się na ponad 2000 osób dziennie.
Czas pomiarów	10 dni w okresie wiosennym
Wentylacja	Budynek wyposażony jest w nietypowy system wentylacji grawitacyjnej. Rolę zbiorczych kanałów wentylacyjnych pełnią pustki powietrzne zlokalizowane w przestrzeni podwójnych ścian pomiędzy korytarzami a pomieszczeniami. Pierwotnie w salach audytorijnych przeznaczonych dla ponad 50 studentów przewidziano instalacje wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej. Obecnie w większości te systemy nie są już użytkowane. Pomieszczenia laboratoryjne wyposażone są w różnego rodzaju systemy wentylacji wyciągowej (digestoria, okapy itp.). Instalacje te, jakkolwiek technologicznie przestarzałe, są sprawne.
Urządzenie pomiarowe CO₂	Czujnik CO ₂ IAQ-CLAC model 8732, Telsaire; Pomiar stężenia CO ₂ w zakresie 0-5000 ppm (błąd pomiaru ±3% odczytu lub ± 50 ppm)
Stężenie CO₂	W salach wykładowych i audytoriach obserwowano podwyższone stężenia CO₂ sięgające 2500 ppm . Stężenia CO ₂ wykazały spodziewaną korelację z liczbą użytkowników przypadającą na 1 m ² pomieszczenia.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Mate Szabados, Reka Kakucs, Anna Paldy, Bohumil Kotlík , Helena Kazmarova, Arianna Dongiovanni, Andrea Di Maggio, Anna Kozajda, Anja Jutraz, Andreja Kukec, Peter Otorepec, Tamas Szigeti Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe –The InAirQ study, Indoor Air 02.2021
Rok badania	11.2017/04.2018
Miasto	Brak informacji
Obiekt badania	64 budynki szkół podstawowych (Republika Czeska, Węgry, Włochy, Polska – woj. łódzkie i Słowenia)
Liczba użytkowników	Brak informacji
Czas pomiarów	Pomiar ciągły
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	skalibrowane urządzenia z interwałem czasu zbierania danych 1–3 min.
Stężenie CO₂	767 – 4700 ppm Najwyższe średnie godzinowe stężenie dwutlenku węgla osiągnęło 4700 ppm i zmierzono je w słoweńskim budynku szkolnym. Jednak średnie stężenie godzinowe powyżej 4000 ppm uzyskano również w innych krajach z wyjątkiem Czech. Skrajną duszność powietrza stwierdzono w dwóch salach lekcyjnych (3,1%), jednej na Węgrzech i jednej w Polsce. W 81% zbadanych szkół stężenie dwutlenku węgla wyniosło ponad 1000 ppm.
Autor/Tytuł/Czasopismo	Mate Szabados, Reka Kakucs, Anna Paldy, Bohumil Kotlík , Helena Kazmarova, Arianna Dongiovanni, Andrea Di Maggio, Anna Kozajda, Anja Jutraz, Andreja Kukec, Peter Otorepec, Tamas Szigeti Association of parent-reported health symptoms with indoor air quality in primary school buildings – The InAirQ study, Building and

	Environment 221 (2022) 109339
Rok badania	11.2017/04.2018
Miasto	Brak informacji
Obiekt badania	64 budynki szkół podstawowych (Republika Czeska, Węgry, Włochy, Polska – woj. łódzkie i Słowenia)
Liczba użytkowników	Brak informacji o liczbie dzieci podczas pomiaru
Czas pomiarów	Pomiar ciągły
Wentylacja	grawitacyjna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Skalibrowane urządzenia z interwałem czasu zbierania danych 1–3 min.
Stężenie CO₂	<p>W poprzednim artykule wykazano istotną dodatnią korelację między stężeniami CO₂ a stężeniami aldehydów oraz korelację ujemne między stężeniem CO₂ a szybkością wymiany powietrza i wentylacją.</p> <p>Stwierdzono, że dzieci często skarżą się na choroby układu oddechowego i oddechowe objawy ogólne. Najwyższe wystąpienia ostatnich objawów zdrowotnych stwierdzono w Polsce. Na podstawie uzyskanych wyników powiązано zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach z objawami zdrowotnymi, największe obawy dotyczyły niektórych LZO (benzenu, etylobenzenu, ksylenów), aldehydów (formaldehyd, aldehyd octowy, aldehyd propionowy, heksanal), PM_{2,5} i CO₂ w badanych klasach.</p> <p>Szkoły z najwyższymi wskaźnikami dzieci z alergicznym nieżytem nosa (sezonowym i/lub całorocznym) stwierdzono w Polsce, pozostałe objawy – suchy kaszel, suche gardło itp.</p>
Autor/Tytuł/Czasopismo	Jakub Bartyzel, Damian Zięba, Jarosław Nęcki, Mirosław Zimnoch Assessment of Ventilation Efficiency in School Classrooms Based on Indoor–Outdoor Particulate Matter and Carbon Dioxide Measurements, Sustainability MDPI, Published: 12 July 2020
Rok badania	2019/2020
Miasto	Roczyny, Sidzina, Skąła, Wolbrom, Chocznią, Tomice, Nowy Targ, Paszyn, Otwock, Piastów
Obiekt badania	Dziesięć klas w różnych szkołach w całej Polsce
Liczba użytkowników	16-30
Czas pomiarów	Dwa tygodnie pomiarowe w każdej szkole
Wentylacja	9 szkół wentylacja grawitacyjna, 1 mechaniczna
Urządzenie pomiarowe CO₂	Sensirion Inc. model SCD30
Stężenie CO₂	<p>W każdym przypadku pomiarowym stężenia CO₂ chwilowo przekraczały 1500 ppm. Maksymalna obserwowana wartość wynosiła ponad 3000 ppm (ok. 3500 ppm).</p> <p>Ekstremalnie wysokie stężenia CO₂ w salach lekcyjnych jest wyraźnie spowodowana słabą wydajnością wentylacji.</p>

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, iż w polskich szkołach, gdzie wykorzystywana jest wentylacja grawitacyjna, poziom CO₂ przekracza zalecane 1000 ppm (względem poziomu w powietrzu zewnętrznym) już po kilkunastu minutach od rozpoczęcia zajęć. Problem potęgowany jest przez czynności modernizacyjne ograniczające dopływ świeżego powietrza do sal lekcyjnych.

Odwołując się do pracy 19 naukowców „*Indoor Air Quality and Health in Schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment*” (Sadrižadeh i in., 2022) stwierdzono, że problem złej jakości powietrza w szkołach dotyczy nie tylko Polski, ale również krajów Unii Europejskiej i z poza jej granic. W większości środowisk szkolnych na świecie stężenia CO₂ są wysokie, ponieważ wentylacja naturalna jest podstawowym rozwiązaniem wykorzystywanym do poprawy jakości powietrza (Canha i in., 2016; Schibuola i in., 2018; Schibuola i in., 2018a). WHO nie traktuje CO₂ jako zanieczyszczenia. Podczas, gdy jego stężenie wpływa na ocenę jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach (z ang. IAQ - indoor air quality) (Schibuola, Tambani, 2020), co często jest błędnie interpretowane przez branżę HVAC, pomimo wysiłków zmierzających do rozwiązania tej nieścisłości w normach, raportach technicznych, doniesieniach konferencyjnych itp. (ASHRAE, 2022). Aktywność fizyczna uczniów, sposób eksploatacji pomieszczeń (otwieranie okien, drzwi) oraz wydajność wentylacji wpływają na poziom CO₂ w salach lekcyjnych (Heebøll i in., 2018; Stabile i in., 2019; Kapalo i in., 2019). Al.-Awadi (2018) i in. zbadali wpływ stężenia CO₂ na zdrowie uczniów w trzech szkołach w Kuwejcie. Ich wyniki wykazały wpływ wysokiego stężenia CO₂ w salach lekcyjnych na obniżenie wyników w nauce. Madureira i in. (2015) badali związek między poziomem tego zanieczyszczenia w szkołach podstawowych w Portugalii a problemami zdrowotnymi, takimi jak alergia i astma. Ich pomiary wykazały, że stężenie CO₂ przekraczało 1000 ppm w salach lekcyjnych o dużym obciążeniu, obniżając w ten sposób jakość powietrza w pomieszczeniach. Dane dotyczące stężenia CO₂ wykorzystano również do oceny wzrostu zachorowań na choroby zakaźne przenoszone drogą powietrzną w 45 salach lekcyjnych w 11 szkołach w Wielkiej Brytanii (Vouriot i in., 2021). W badaniu powiązano zmienność stężenia CO₂ i szybkości wentylacji z ryzykiem infekcji w zależności od pory roku, przy czym największe ryzyko odnotowano w styczniu. Kalimeri i in. (2016) mierzyli m.in. stężenie CO₂, wilgotność względną, temperaturę i formaldehyd w środowiskach szkolnych w Grecji. Wykazali, że nieodpowiednia wentylacja była główną przyczyną złej jakości powietrza w pomieszczeniach. Turunen i in. (2013) zbadali IAQ i stan zdrowia uczniów klas szóstych w szkołach w Finlandii i odkryli istotną korelację statystyczną pomiędzy temperaturą a zgłaszaną złą jakością powietrza w pomieszczeniach. Stwierdzono również, że im niższa skuteczność wentylacji i wyższa temperatura, tym więcej uczniów zgłasza, że (CAQ z ang. class air quality) jakość powietrza jest słaba. Smedje i wsp. (Szwecja) (1997) nie stwierdzili istotnego związku pomiędzy objawami astmy a prawidłowo zmierzonymi parametrami IAQ, takimi jak stężenie CO₂ i wilgotność. Simoni i wsp. (2010) zbadali układy oddechowe uczniów w Norwegii i stwierdzili, że dzieci przebywające często w pomieszczeniach, gdzie występuje wysokie stężenie CO₂ (powyżej 1000 ppm), są bardziej narażone na suchy kaszel. Podobna sytuacja dotyczyła PM₁₀ i objawów związanych z drożnością górnych dróg oddechowych (głównie nosa). Wargocki i in. (2020) przeanalizowali opublikowane badania dotyczące wpływu CAQ, w których podano wyniki pomiarów CO₂ (przybliżony wskaźnik oceny wentylacji w klasie) wraz z wydajnością poznawczą uczniów. Ich celem było ustalenie wpływu parametrów środowiska wewnętrznego na wyniki uczniów i próba określenia minimalnych wymagań związanych z jakością powietrza niezbędną do zapewnienia odpowiednich warunków nauki. Odrębnie przeanalizowali wyniki badań

oceniających pracę szkolną, oceny i egzaminy oraz wskaźniki absencji. Wobec braku wskaźnika jakości powietrza wykorzystali CO₂ jako poziom odniesienia do oceny IAQ (wentylacji). Rys. 1 przedstawia zależności wynikające z przeprowadzonej analizy. Wargocki i in. doszli do wniosku, że zwiększenie szybkości wentylacji w salach lekcyjnych do 10 l/s na osobę przyniosłoby znaczące korzyści i usprawniłoby naukę oraz zmniejszyłoby absencję. Stwierdzono, że stężenie CO₂ powinno być utrzymywane na poziomie lub poniżej 900 ppm. Nie znaleziono danych, czy poziomy CO₂ niższe niż 900 ppm lub szybkości wentylacji wyższe niż 10 l/s na osobę przyniosłoby dodatkowe korzyści. Biorąc jednak pod uwagę, że zależność między wydajnością pracy a wentylacją jest log-liniowa, prawdopodobne jest, że dodatkowe usprawnienia wentylacji przyniosłoby dalsze korzyści, na co wskazują również zależności przedstawione na rys 1.



Rys. 1. Szybkość wykonywania zadań szkolnych, testów i egzaminów ogólnokrajowych, uczenia się wraz z dzienną frekwencją uczniów w odniesieniu do wentylacji (Wargocki i in., 2020)

Bibliografia:

1. Al-Awadi L. Assessment of indoor levels of volatile organic compounds and carbon dioxide in schools in Kuwait. J. Air Waste Manag. Assoc. 2018; 68:54–72
2. ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide 2022
3. Bartyzel J., Zięba D., Nęcki J., Zimnoch M. Assessment of Ventilation Eciency in School Classrooms Based on Indoor–Outdoor Particulate Matter and Carbon Dioxide Measurements, Sustainability MDPI 2020

4. Basińska M, Michałkiewicz M, Ratajczak K. Impact of physical and microbiological parameters on proper indoor air quality in nursery, *Environment International* 2019; 132:105098
5. Cai W, Yoshino H, Zhu S, Yanagi U, Kagi N, Hasegawa K. Investigation of Microclimate and Air Pollution in the Classrooms of a Primary School in Wuhan. *Procedia Eng.* 2015; 121:415–422
6. Canha N, Mandin C, Ramalho O, Wyart G, Ribéron J, Dassonville C, et al. Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air* 2016; 26:350–365
7. Cichowicz R., Gawron-Skarbek A., Godala M., Zimna-Walendzik E., Sabiniak H., Szatko F. Ocena stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wybranych pomieszczeń uczelni wyższej, *Prob Hig Epidemiol* 2014, 95(2):287-291
8. 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
9. Ferdyn-Grygierek J. Jakość powietrza i wentylacja w budynkach edukacyjnych, *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej* 2008, Seria: Architektura z. 47, Nr kol. 1787
10. Gładyszewska-Fiedoruk K. Analysis of stack ventilation system effectiveness in an average kindergarten in north-eastern Poland, *Energy and Buildings* 2011; 43:2488–2493
11. Górny RL. Cząstki grzybów i bakterii jako składniki aerozolu pomieszczeń: właściwości, mechanizmy emisji, detekcja. Sosnowiec. Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego 2004; ss. 164
12. Heebøll A, Wargocki P, Toftum J. Window and door opening behavior, carbon dioxide concentration, temperature, and energy use during the heating season in classrooms with different ventilation retrofits—ASHRAE RP1624. *Sci. Technol. Built Environ.* 2018; 24:626–637
13. Johnson DL, Lynch RA, Floyd EL, Wang J, Bartels JN. Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. *Build. Environ.* 2018; 136:185–197
14. Kalimeri KK, Saraga DE, Lazaridis VD, Legkas NA, Missia DA, Tolis EI, et al. Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece. *Atmos. Pollut. Res.* 2016; 7:1128–1142
15. Kapalo P, Mečiarová Ľ, Vilčeková S, Krídlová Burdová E, Domnita F, Bacotiu C, et al. Investigation of CO₂ production depending on physical activity of students. *Int. J. Environ. Health Res.* 2019; 29:31–44
16. Krawczyka D.A., Roderob A., Gładyszewska-Fiedoruka K., Gajewski A. CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located indifferent climates—Measurements and simulations, *Energy and Buildings* 2016; 129:491–498

17. Madureira J, Paciência I, Ramos E, Barros H, Pereira C, Teixeira JP, et al. Childrens health and indoor air quality in primary schools and homes in Portugal - Study design. *J. Toxicol. Environ. Heal. - Part A Curr. Issues* 2015; 78:915–930
18. Mainka A., Zajusz-Zubek E. Determination on Carbon Dioxide Levels in School Buildings: the Effect of Thermal Efficiency Improvement; *Engineering and Protection of Environment* 2018; 21(2): 155-162
19. Mainka A., Zajusz-Zubek E. Indoor Air Quality in Urban and Rural Preschools in Upper Silesia, Poland: Particulate Matter and Carbon Dioxide, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2015; 12:7697-7711
20. Mainka A., Zajusz-Zubek E., Kozielska B., Brągoszewska E. Investigation of air pollutants in rural nursery school – a case study, *Air Protection in Theory and Practice, E3S Web of Conferences*; 2018, 28: 01022
21. Mainka A., Zajusz-Zubek E., Kozielska B., Brągoszewska E.. Badanie zanieczyszczeń powietrza oddziałujących na dzieci w przedszkolu miejskim zlokalizowanym przy drodze o dużym natężeniu ruchu, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2015, t. 18 (1), s. 119-133
22. Mijakowski M, Sowa J. An attempt to improve indoor environment by installing humidity-sensitive air inlets in a naturally ventilated kindergarten building, *Building and Environment* 2017; 111: 180-191
23. PN-EN 12792:2006 – wersja polska, Wentylacja budynków - Symbole, terminologia i oznaczenia na rysunkach
24. PN-EN 14031:2006 – wersja polska, Powietrze na stanowiskach pracy - Oznaczenie endotoksyn zawieszonych w powietrzu
25. PN-EN 16798-1:2019-06 – wersja polska, 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, oświetlenia i akustyki -- Moduł M1-6
26. PN-EN 481:1998 – wersja polska, Atmosfera miejsca pracy - Określenie składu ziarnowego dla pomiaru cząstek zawieszonych w powietrzu
27. Połednik B. Particulate matter and student exposure in school classrooms in Lublin, Poland, *Environmental Research* 2013; 120:134–139
28. Sadrizadeh S, Yao R, Yuan F, Awbi H, Bahnfleth W, Bi Y, Cao G, Croitoru C, de Dear R, Haghighat F, Kumar P, Malayeri M, Nasiri F, Ruud M, Sadeghian P, Wargocki P, Xiong J, Yu W, Li B. Indoor Air Quality and Health in Schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering* S2352-7102(22)00920-2
29. Schibuola L, Scarpa M, Tambani C. CO₂ based ventilation control in energy retrofit: An experimental assessment. *Energy* 2018; 143:606–614
30. Schibuola L, Scarpa M, Tambani C. Performance optimization of a demand controlled ventilation system by long term monitoring. *Energy Build.* 2018; 169:48–57

31. Schibuola L, Tambani C. Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO₂ concentration levels. *Atmos. Pollut. Res.* 2020; 11:332–342
32. Simoni M, Annesi-Maesano I, Sigsgaard T, Norback D, Wieslander G, Nystad W, et al. School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *Eur. Respir. J.* 2010; 35:742–749
33. Smedje G, Norbäck D, Edling C. Asthma among secondary schoolchildren in relation to the school environment. *Clin. Exp. Allergy* 1997; 27:1270–1278
34. Sowa J. Air quality and ventilation rates in schools in poland - requirements, reality and possible improvements, *Proceedings: Indoor Air 2002*
35. Sowa J., Noga-Zygmunt J., Ugorowska J. Ocena parametrów powietrza wewnętrznego w budynku wyższej uczelni przed przewidywaną modernizacją do standardu niemal zero energetycznego, *Fizyka budowli w teorii i praktyce tom IX, nr 3 – 2017*
36. Stabile L, Buonanno G, Frattolillo A, Dell’Isola M. The effect of the ventilation retrofit in a school on CO₂, airborne particles, and energy consumptions. *Build. Environ.* 2019; 156:1–11
37. Stetzenbach LD, Buttner MP, Cruz P. Detection and enumeration of airborne biocontaminants. *Current Opinion in Biotechnology.* 2004; 15:170–174.
38. Telejko M. Attempt to improve indoor air quality in computer laboratories, *Procedia Engineering* 2017; 172:1154 – 1160
39. Turunen M, Toyinbo O, Putus T, Nevalainen A, Shaughnessy R, Haverinen-Shaughnessy U. Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 2013; 217:733–739
40. Vouriot CVM, Burrige HC, Noakes CJ, Linden PF. Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. *Indoor Air* 2021; 31:1154–1163
41. Wargocki P, Porras-Salazar JA, Contreras-Espinoza S, Bahnfleth W. The relationships between classroom air quality and children’s performance in school. *Build. Environ.* 2020; 173
42. Zender – Swiercz E, Telejko M. Indoor Air Quality in Kindergartens in Poland, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2019; 471: 092066