



Analiza wpływu systemu wentylacji na jakość powietrza i zapotrzebowanie na energię w zmodernizowanym budynku szkoły

Analysis of the impact of ventilation systems on indoor air quality and energy demand in a retrofitted school building



Dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-4742-5263](https://orcid.org/0000-0002-4742-5263)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska

joanna.ferdyn-grygierek@polsl.pl



Dr hab. inż. Krzysztof Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-7049-1939](https://orcid.org/0000-0002-7049-1939)

Wydział Budownictwa

Politechnika Śląska

Słowa kluczowe: szkoła, wentylacja, zużycie energii, efektywność energetyczna, jakość powietrza, symulacja energetyczna

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę efektywności energetycznej i jakości powietrza w budynku szkoły podstawowej po termomodernizacji w zależności od przyjętej strategii wentylacji. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sprzężonej symulacji dynamicznej (EnergyPlus-CONTAM), uwzględniającej rzeczywiste warunki użytkowania obiektu, emisję zanieczyszczeń oraz zmienność warunków zewnętrznych. Rozpatrzono cztery warianty wentylacji: grawitacyjną, hybrydową z wietrzeniem, mechaniczną o stałym strumieniu powietrza oraz mechaniczną ze zmiennym strumieniem sterowanym stężeniem CO₂. Wykazano, że wentylacja grawitacyjna nie zapewnia wymaganej jakości powietrza, ponad 80% czasu użytkowania sal lekcyjnych przypada na najniższą kategorię jakości (stężenie CO₂ > 1750 ppm), mimo bardzo niskiego zużycia energii. Wprowadzenie wietrzenia poprawia warunki środowiska (udział kategorii IV spada do 16%), jednak ponad 50% czasu nadal nie spełnia wymagań normowych, a zużycie energii wzrasta o ok. 170%. Zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła pozwala na utrzymanie wysokiej jakości powietrza (ponad 95% czasu w kategoriach I–II) przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii o ok. 35% względem wariantu z wietrzeniem. Dodatkowe zastosowanie regulacji wydajności central wentylacyjnych (VAV) umożliwia dalszą redukcję zużycia energii o ok. 6% w skali budynku oraz ograniczenie zużycia energii elektrycznej do napędu wentylatorów o ok. 45%. Wyniki wskazują, że kompleksowa modernizacja budynków szkolnych powinna obejmować nie tylko poprawę izolacyjności przegród, lecz również modernizację systemu wentylacji.

Keywords: school, ventilation, energy consumption, energy efficiency, air quality, energy simulation

Abstract

This paper presents an assessment of energy performance and indoor air quality in a primary school building after thermal retrofitting, depending on the applied ventilation strategy. The analysis was carried out using coupled dynamic simulation (EnergyPlus-CONTAM), taking into account actual occupancy patterns, pollutant emissions, and varying outdoor conditions. Four ventilation scenarios were considered: natural (gravity) ventilation, hybrid ventilation with window airing, mechanical ventilation with constant airflow, and mechanical ventilation with variable airflow controlled by CO₂ concentration. The results show that natural ventilation does not ensure the required indoor air quality, with over 80% of occupied classroom time falling into the lowest quality Category (CO₂ > 1750 ppm), despite very low energy consumption. The introduction of window airing improves indoor conditions (the share of Category IV decreases to 16%); however, for more than 50% of the time, the conditions still do not meet standard requirements, while energy consumption increases by approximately 170%. The use of mechanical ventilation with heat recovery enables maintaining high indoor air quality (over 95% of the time in Categories I–II) while reducing energy consumption by approximately 35% compared to the window airing scenario. The additional application of variable air volume ventilation (VAV) allows for further reduction of energy consumption by about 6% at the building scale and decreases fan electricity use by approximately 45%. The results indicate that comprehensive retrofitting of school buildings should include not only improvements to the thermal envelope but also modernization of the ventilation system.

Wstęp

Zapewnienie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego w budynkach edukacyjnych stanowi jedno z kluczowych zagadnień współczesnej inżynierii środowiska. W ostatnich latach działania modernizacyjne w istniejących obiektach koncentrują się przede wszystkim na poprawie efektywności energetycznej przez docieplenie

przegród zewnętrznych oraz wymianę stolarki okiennej. Prowadzi to jednak do istotnego ograniczenia infiltracji powietrza, co w przypadku braku równoczesnej modernizacji systemu wentylacji skutkuje pogorszeniem jakości środowiska wewnętrznego. Problem ten ma szczególne znaczenie w budynkach szkolnych, gdzie występuje duże zagęszczenie użytkowników oraz znaczna zmienność obciążenia pomieszczeń w ciągu dnia.

Zgodnie z §147 ust. 2 rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022), wentylację należy zapewnić w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. Jednocześnie §154 ust. 1 wskazuje, że system wentylacji powinien umożliwiać uzyskanie wymaganej jakości środowiska wewnętrznego przy racjonalnym zużyciu energii. W praktyce oznacza to konieczność poszukiwania rozwiązań zapewniających jednocześnie odpowiednią jakość powietrza oraz wysoką efektywność energetyczną.

W literaturze przedmiotu wielokrotnie wskazywano, że niewystarczająca intensywność wentylacji prowadzi do pogorszenia jakości powietrza wewnętrznego, natomiast jej nadmiar powoduje wzrost zapotrzebowania na energię (Zhang i in., 2021; Fix i in. 2022). Badania prowadzone w różnych warunkach klimatycznych wykazały, że w budynkach wentylowanych naturalnie obserwuje się wyższe stężenia zanieczyszczeń, w tym CO₂, w porównaniu z obiektami wyposażonymi w wentylację mechaniczną (Wallner i in., 2015; Stabile i in., 2019; Rizzo i in., 2024). Jednocześnie podkreśla się istotny wpływ sposobu użytkowania budynku oraz zachowań użytkowników, w szczególności w zakresie wietrzenia pomieszczeń (McGill i in., 2015; Park & Kim, 2012; Pereira i in., 2017).

Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w kontekście termomodernizacji istniejących budynków. Jak wskazują liczne badania, poprawa izolacyjności cieplnej oraz zwiększenie szczelności powłoki zewnętrznej bez modernizacji systemu wentylacji prowadzi do obniżenia intensywności wymiany powietrza i wzrostu stężeń zanieczyszczeń (Măgurean & Petran, 2023; Calama-González i in., 2021; Coggins i in. 2022; Calama-González i in., 2019). Zjawisko to dotyczy zarówno budynków mieszkalnych, jak i użyteczności publicznej, w tym szkół.

W praktyce eksploatacyjnej niedostateczna wentylacja kompensowana jest często przez okresowe otwieranie okien. Rozwiązanie to jest jednak trudne do kontrolowania, zależne od warunków zewnętrznych oraz zachowań użytkowników, a w okresie zimowym prowadzi do znacznych strat energii i dużych wahań warunków cieplnych (Heebøll i in., 2018; Calama-González i in., 2019; Grygierek i in., 2023). Alternatywę stanowią systemy wentylacji mechanicznej, w tym systemy o zmiennej wydajności, w których strumień powietrza dostosowywany jest do aktualnego zapotrzebowania na podstawie pomiarów parametrów jakości powietrza, najczęściej stężenia CO₂ (Li i in., 2022; Ye i in., 2021; Zhuang i in., 2021). Zastosowanie takich systemów umożliwia ograniczenie zużycia energii przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej jakości środowiska wewnętrznego (Zhang i in., 2021; Merema i in. 2018), co potwierdzają również badania prowadzone w budynkach szkolnych (Amanowicz i in., 2019; Rizzo i in., 2024). W praktyce projektowej konieczne jest zatem poszukiwanie rozwiązań zapewniających jednocześnie wysoką jakość powietrza i racjonalne zużycie energii. W ostatnich latach zwraca się uwa-

gę na rozwiązania hybrydowe (mixed-mode ventilation), które łączą zalety wentylacji naturalnej i mechanicznej, umożliwiając poprawę jakości powietrza przy ograniczeniu zużycia energii (Otoo i in., 2024).

W związku z powyższym celem niniejszej pracy jest analiza wpływu różnych strategii wentylacji na jakość powietrza wewnętrznego oraz zapotrzebowanie na energię w budynku polskiej szkoły podstawowej po termomodernizacji. Analizy oparto na wynikach symulacji wydajności budynku z wykorzystaniem programów EnergyPlus i CONTAM, przeprowadzonych w dynamicznych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych z małym krokiem czasowym dla całego sezonu grzewczego.

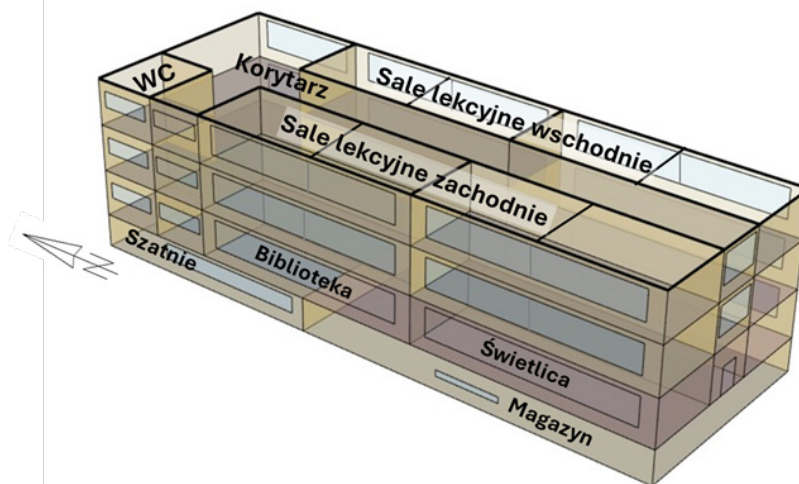
Metodyka

Opis budynku

Obiekt badań stanowi budynek szkoły podstawowej zbudowany w latach 60.–70. XX wieku (tzw. „tysiąclatka”). Budynek jest czterokondygnacyjny (powierzchnia 2912 m² i kubatura 9464 m³), wolnostojący, o zwartej bryle i układzie korytarzowym (Rysunek 1). Posiada 16 typowych sal lekcyjnych o powierzchni 54 m² każda i jedną salę specjalną o powierzchni 108 m², w których uczy się 25 lub 30 uczniów oraz pomieszczenia pomocnicze, takie jak świetlica, biblioteka, toalety (WC), biuro, szatnie (całkowita liczba użytkowników to 440 osób).

Po termomodernizacji przegrody zewnętrzne spełniają aktualne wymagania cieplne ($U \approx 0,15\text{--}0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), a okna ($U_{\text{szyba}} = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) charakteryzują się wysoką szczelnością. Budynek wyposażony jest w instalację ogrzewania wodnego z regulacją miejscową oraz wentylację grawitacyjną (wszystkie pomieszczenia, oprócz korytarzy, wyposażone są w przewody grawitacyjne).

Szkoła użytkowana jest w dni robocze w godzinach 7:00–16:15. Zajęcia dydaktyczne odbywają się w godzinach 8:00–14:35 (45-minutowe lekcje z przerwami 10- i 20-minutowymi), z możliwością zajęć dodatkowych do godz. 16:15. W czasie przerw uczniowie przebywają na korytarzach. Praca administracji odbywa się w godzinach 7:00–15:00.



Rysunek 1. Widok szkoły od strony południowo-zachodniej. Źródło: opracowanie własne

Figure 1. View of the school from the southwest. Source: authors' own study

Tabela 1. Warianty obliczeniowe. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Calculation variants. Source: authors' own study

Wariant	Rodzaj wentylacji	Opis
1	Naturalna	Wszystkie okna zamknięte; wentylacja wyłącznie grawitacyjna
2	Naturalna z dodatkowym przewietrzaniem	Okna wyposażone w nawiewniki powietrza (pełne otwarcie w godz. 7:00–17:00, w pozostałym czasie przymknięte do ok. 20% wydajności). Sale lekcyjne: wietrzenie przez otwieranie okien (0,8×1,4 m) podczas przerw. WC: wentylacja mechaniczna wywiewna w godzinach użytkowania szkoły (WC damskie 200 m ³ /h, WC męskie 160 m ³ /h), w pozostałym czasie wentylacja grawitacyjna – wentylatory dachowe działają jak wywietrzaki. Pozostałe pomieszczenia: wentylacja grawitacyjna; okna zamknięte.
3	Mechaniczna nawiewno-wywiewna (stały strumień)	Sale lekcyjne: wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna ze stałym strumieniem powietrza 7020 m ³ /h, z odzyskiem ciepła ($\eta_c = 82\%$). Strumień powietrza (ok. 2 h ⁻¹): 390 m ³ /h w salach standardowych oraz 780 m ³ /h w sali specjalnej. System pracuje w godz. 8:00–16:30. W pozostałym czasie: wentylacja grawitacyjna ¹⁾ . WC i pozostałe pomieszczenia: jak w wariantcie 2. Okna zamknięte.
4	Mechaniczna nawiewno-wywiewna (zmienny strumień, VAV)	Sale lekcyjne: wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna ze zmiennym strumieniem powietrza, z odzyskiem ciepła ($\eta_c = 82\%$), sterowana stężeniem CO ₂ (400 ppm → 80 m ³ /h; 1800 ppm → 800 m ³ /h). System pracuje w godz. 8:00–16:30. W pozostałym czasie: wentylacja grawitacyjna ¹⁾ . WC i pozostałe pomieszczenia: jak w wariantcie 2. Okna zamknięte.

¹⁾ Zgodnie z §154 ust. 1 rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022) w godzinach użytkowania zastosowano wentylację mechaniczną, natomiast poza nimi – wentylację grawitacyjną. Oba systemy są dopuszczone (§147 ust. 2), jednak zgodnie z §148 ust. 2 nie mogą pracować jednocześnie, dlatego podczas pracy wentylacji mechanicznej kratki grawitacyjne są zamykane.

Model symulacyjny – dane ogólne

Do analizy zastosowano sprzężoną symulację dynamiczną z wykorzystaniem programów EnergyPlus i CONTAM. EnergyPlus 9.4 (US Department of Energy, Washington, DC, USA) wykorzystano do obliczeń bilansu cieplnego budynku, natomiast CONTAM 3.4 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA) do modelowania przepływów powietrza oraz transportu zanieczyszczeń. Sprzężenie modeli było konieczne ze względu na brak w EnergyPlus dokładnego modelu działania kominów grawitacyjnych, które mają kluczowe znaczenie w analizowanym przypadku.

Model uwzględnił:

- zmienne warunki klimatyczne (Typowe lata meteorologiczne dla Warszawy),
- zyski ciepła od użytkowników (zgodnie z ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2017); dla uczniów przyjęto 75% wartości) i oświetlenia (uruchamiane w godzinach użytkowania jeśli natężenie oświetlenia spadnie poniżej 300 lx, moc maksymalna to 5 W/m²),
- emisję CO₂ (0,0032 dm³/s na osobę zgodnie z (Persily & de Jonge, 2017)); stężenie w powietrzu zewnętrznym to 400 ppm,
- harmonogram użytkowania budynku (uwzględniono dni wolne od nauki tj. weekendy, przerwy świąteczne (grudzień i kwiecień), ferie zimowe (2 tygodnie w lutym)).

Budynek podzielono na 21 stref obliczeniowych. Dwie sale lekcyjne leżące obok siebie połączono w jedną strefę (co dało w sumie 8 wersji sal o różnym obciążeniu plus sala specjalna), zakładając w tych salach identyczny plan lekcji. W jedną strefę połączono również WC chłopców i dziewcząt w obrębie jednej kondygnacji.

Model wentylacji

W obliczeniach uwzględniono: infiltrację, przepływy międzystrefowe, działanie kominów grawitacyjnych, wpływ wiatru i wyporu termicznego. Przepływ powietrza przez nieszczelności opisano zależnością potęgową:

$$\dot{V} = a \times l \times (\Delta p)^n, \text{ m}^3/\text{h}$$

gdzie:

- a – współczynnik szczelności, m³/(m·h·Pa ^{n})
- l – długość szczeliny, m
- n – wykładnik charakterystyki potęgowej,
- Δp – różnica ciśnienia, Pa

Na podstawie literatury (Popiołek, 2013; Ferdyn-Grygier i in., 2019) przyjęto następujące wartości a i n :

- dla okien $a = 0,1 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^{0,67})$, $n = 0,67$,
- dla drzwi wejściowych zewnętrznych $a = 0,14 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^{0,5})$, $n = 0,5$,
- dla drzwi wewnętrznych $a = 2,8 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^{0,5})$, $n = 0,5$.

Założono, że drzwi są zamknięte cały czas. Przewody grawitacyjne przyjęto jako murowane o wymiarach 27×14 cm, chropowatości 3 mm i sumie współczynników strat miejscowych wynoszącej 3,4. Kminy są wysunięte ponad dach na wysokość 1,5 m.

Model ogrzewania

Temperatury obliczeniowe przyjęto następująco: 21°C w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi oraz na korytarzach, 18°C w szatni i 8°C w magazynie. Uwzględniono harmonogram regulacji temperatury – w dni robocze w godzinach 17:00–6:00 oraz w weekendy przyjęto obniżenie temperatury do 18°C. Źródłem ciepła do ogrzania pomieszczeń jest gazowy kocioł o sezonowej sprawności wytwarzania ciepła 94%. Sprawność całego systemu na podstawie rozporządzenie Ministra Infra-

struktury i Rozwoju w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015) określono jako 75%.

Warianty obliczeniowe

Program wykonanych analiz opisano w Tabeli 1. Wszystkie obliczenia przeprowadzono z krokiem czasowym 5 minut dla okresu grzewczego od października do kwietnia.

Jako wskaźnik jakości powietrza przyjęto stężenie CO₂ w salach lekcyjnych. Przyjęto kryteria jakości środowiska zgodne z PN-EN 16798-1 (PKN, 2019): I kategoria – 550 ppm ponad tło, II kategoria – 800 ppm ponad tło, III kategoria – 1350 ppm ponad tło.

Jako wskaźnik efektywności cieplnej przyjęto wskaźnik energii końcowej (E_k) dla całego budynku oraz dla porównania tylko dla sal lekcyjnych. Rozpatrywano dwa okresy uśredniania wyników:

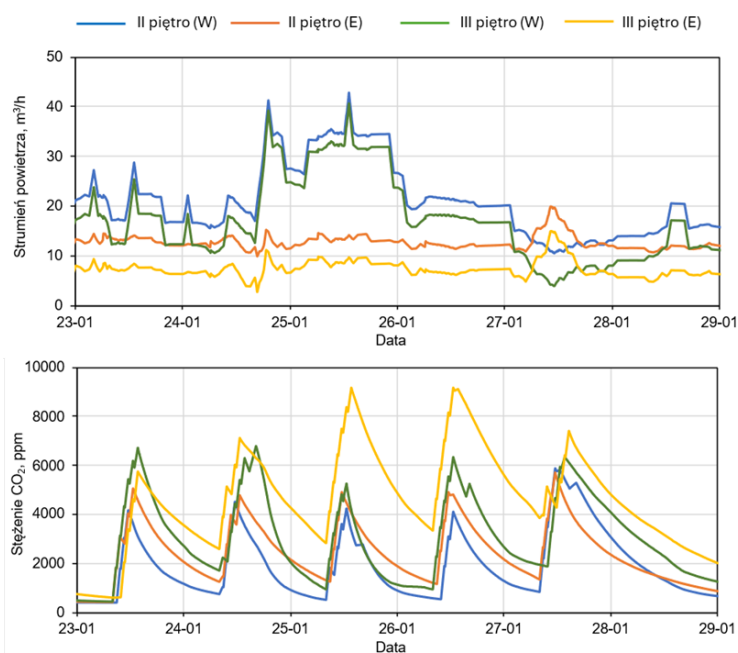
- czas trwania lekcji (netto) – dla określania przeciętnego stężenia CO₂ w salach lekcyjnych,
- cała doba bez względu na rodzaj dnia – dla określania przeciętnej liczby wymian powietrza w pomieszczeniach i zapotrzebowania na energię budynku.

Wyniki

Wentylacja i jakość powietrza

W przypadku wentylacji naturalnej (wariant 1) wymiana powietrza w salach lekcyjnych jest mocno zróżnicowana (Rysunek 2a). Strumień powietrza wywołany siłą wiatru i wyporem hydrostatycznym zależy od usytuowania pomieszczeń w zależności od strony świata i kondygnacji. Pomieszczenia o ekspozycji zachodniej charakteryzuje większa średnia wymiana powietrza. Z kolei najmniej przepływ powietrza występuje w pomieszczeniach na ostatniej kondygnacji o ekspozycji wschodniej. Szkołę w tym wariantie charakteryzuje bardzo słaba wentylacja. Przeciętna liczba wymian powietrza świeżego w salach szkolnych jest na poziomie 0,1 h⁻¹ (Tabela 2) i zmienia się w zakresie od 0,09 h⁻¹ w kwietniu do 0,13 h⁻¹ w lutym. W przeliczeniu na strumień powietrza wartość jest rażąco niska, średnio w sezonie nie przekracza 23 m³/h w salach typowych (czyli poniżej 1 m³/h na osobę). Maksymalna obliczona wartość to 122 m³/h w salach na przedostatniej kondygnacji po stronie zachodniej, co daje tylko 5 m³/h na osobę. Jest to wartość zdecydowanie poniżej wartości wymaganej normą PN EN 16798-1 (PKN, 2019) oraz rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022). Następstwem niskiej wymiany powietrza jest wysokie stężenie CO₂ które chwilowo przekracza nawet 6000 ppm (Rysunek 2b).

Na Rysunku 3a przedstawiono skumulowany rozkład stężenia CO₂ we wszystkich salach typowych w czasie ich użytkowania zgodnie z planem lekcji. Jakość powietrza wewnętrznego w salach 25-osobowych na II piętrze tylko przez 20% czasu można zakwalifikować do III lub lepszej kategorii; w sali bardziej obciążonej tylko przez 10% czasu. W salach na ostatniej kondygnacji, gdzie długość ko-



Rysunek 2. Przebieg zmienności strumienia powietrza i stężenia CO₂ dla wybranego tygodnia w styczniu dla czterech przykładowych sal lekcyjnych o różnej ekspozycji. Źródło: opracowanie własne
Figure 2. Variation of airflow and CO₂ concentration for a selected week in January for four classrooms with different exposures. Source: authors' own study

mina grawitacyjnego jest mała, środowisko można zaklasyfikować do III lub lepszej kategorii przez mniej niż 10% czasu użytkowania sal. Najwyższą I kategorię środowiska można przypisać pomieszczeniom średnio przez mniej niż 5% czasu ich użytkowania.

Powszechną praktyką stosowaną w szkołach jest przewietrzanie sal lekcyjnych w czasie przerw, dlatego w wariantie 2 przetestowano wpływ regularnego otwierania okna (pełne otwarcie) o wymiarach 0,8×1,4 m na każdej przerwie między lekcjami wg planu lekcji. Jest to założenie najbliższe rzeczywistości. Otwieranie okna w czasie lekcji w okresie zimowym jest rzadko stosowane i niezalecane, ponieważ powoduje dyskomfort cieplny uczniów, szczególnie tych siedzących blisko okna. Dodatkowo ten zabieg generuje duży hałas z zewnątrz (dotyczy szkół zlokalizowanych w centrach miast).

W wariantie 2 średnia liczba wymian w typowych salach lekcyjnych wzrosła, w stosunku do przypadku bez otwierania okien, o 280–400% w zależności od usytuowania pomieszczenia (Tabela 2). Tak znaczący wzrost wymiany powietrza jest spowodowany nie tylko otwieraniem okien w czasie przerw lekcyjnych, ale również rozszczelnieniem wszystkich okien za pomocą nawiewników okiennych oraz zastosowania wentylacji mechanicznej wywiewnej w toaletach. W toaletach liczba wymian powietrza zewnętrznego wzrosła z rażąco niskiej wartości poniżej 0,1 h⁻¹ do 0,5 h⁻¹ przy systemie wentylacji mechanicznej wywiewnej. Średnio tylko połowa powietrza wywiewanego przez wentylatory jest powietrzem zewnętrznym zasysanym przez okna w toaletach, reszta pochodzi z korytarzy oraz innych pomieszczeń sąsiadujących z korytarzami, w tym sal lekcyjnych. Dzięki temu poprawia się również znacząco wentylacja w strefach korytarzy szkolnych, które graniczą przez drzwi z toaletami, a które przy braku kanałów grawitacyjnych mają słabą wymianę powietrza.

Tabela 2. Średnie (C_{avg}) i maksymalne (C_{max}) w sezonie stężenie CO_2 oraz średnia liczba wymian powietrza (N_{avg}) w salach lekcyjnych.

Źródło: opracowanie własne

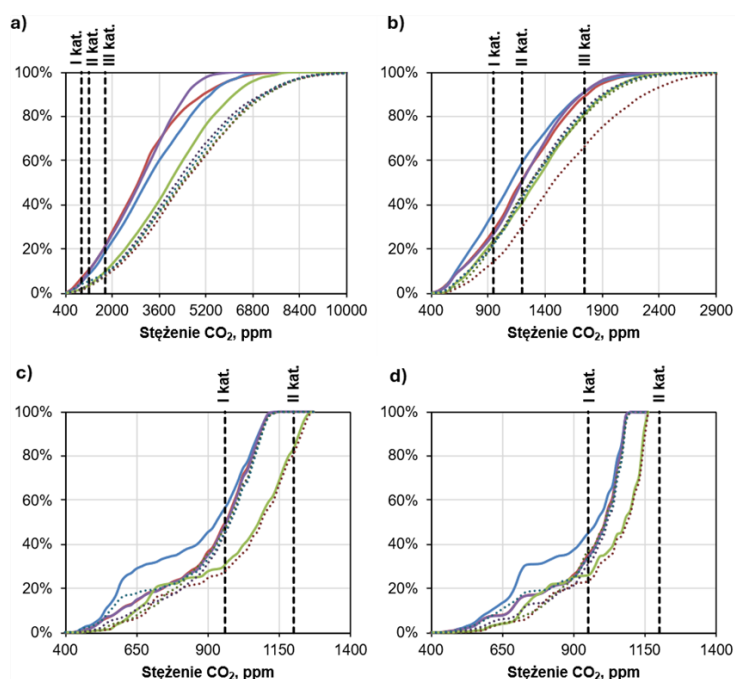
Table 2. Average (C_{avg}) and maximum (C_{max}) CO_2 concentrations during the season and the average air change rates (N_{avg}) in classrooms. Source: authors' own study

Wariant	Kond.	I piętro	II piętro				III piętro			
	Ekspoz.	E	E	E	W	W	E	E	W	W
	Liczba uczniów	25/30 sala specjalna	30	25	25	25	25	25	30	25
1	C_{avg} , ppm	1542	3976	2921	3014	3268	4429	4372	4570	4529
	C_{max} , ppm	3420	8150	6260	7970	7080	11000	11000	11400	10700
	N_{avg} , h ⁻¹	0,13	0,11	0,11	0,12	0,12	0,08	0,08	0,10	0,10
2	C_{avg} , ppm	888	1325	1202	1211	1143	1318	1303	1533	1332
	C_{max} , ppm	1910	3740	2950	3060	2990	3670	3160	3930	3380
	N_{avg} , h ⁻¹	0,31	0,45	0,42	0,43	0,44	0,39	0,40	0,37	0,42
3	C_{avg} , ppm	647	1001	904	901	849	907	927	1021	924
	C_{max} , ppm	817	1270	1130	1130	1130	1130	1130	1270	1130
	N_{avg} , h ⁻¹	0,55	0,53	0,53	0,54	0,54	0,52	0,52	0,53	0,53
4	C_{avg} , ppm	737	1001	941	939	893	941	962	1018	959
	C_{max} , ppm	903	1160	1090	1090	1090	1090	1090	1160	1090
	N_{avg} , h ⁻¹	0,30	0,38	0,33	0,34	0,35	0,37	0,37	0,38	0,39

Na I piętrze średniosezonowy strumień powietrza świeżego wzrósł 2,5-krotnie, natomiast na II i III piętrze aż 4-krotnie. Zastosowanie nawiewników okiennych w pozostałych pomieszczeniach bez wentylacji mechanicznej spowodowało zwiększenie strumienia powietrza świeżego blisko 2-krotnie. Stosowanie nawiewników okiennych jako dodatkowego rozszczelnienia powłoki budynku ma również tą zaletę, że można regulować strumień powietrza wentylacyjnego zmniejszając go w czasie nieużytkowania pomieszczeń, codziennie w godzinach nocnych strumień powietrza jest zredukowany kilkukrotnie.

Na wzrost średniej wartości strumienia powietrza ma wpływ nie tylko rozszczelnienie okien ale przede wszystkim ich otwieranie w czasie przerw. Podczas wietrzenia strumień powietrza przekracza 1200 m³/h, osiągając maksymalną wartość 1765 m³/h, co stanowi ponad 9 wymian powietrza na godzinę. Pomimo, że przerwy stanowią tylko niewielką część doby, wietrzenie zwiększyło średniosezonowy strumień powietrza w salach lekcyjnych 2-krotnie. Liczba wymian powietrza w salach lekcyjnych jest na średnim poziomie 0,4 h⁻¹. Regularne wietrzenie sal poprawia zdecydowanie jakość powietrza w czasie lekcji. Maksymalne stężenie CO_2 jest mniejsze od 4000 ppm, średnio jednak przekracza w salach typowych 1200 ppm. Jakość powietrza wewnętrznego w salach 25-osobowych na II piętrze aż przez 90% czasu można zakwalifikować do III lub lepszej kategorii (Rysunek 3b); w sali bardziej obciążonej przez 80% czasu. W salach na ostatniej kondygnacji, gdzie długość komina grawitacyjnego jest mała, środowisko można zaklasyfikować do III lub lepszej kategorii przez około 80% czasu użytkowania sal mniej obciążonych i przez ok. 65% czasu użytkowania sali 30-osobowej. Najwyższą I kategorię środowiska

można przypisać pomieszczeniom średnio przez mniej niż 30% czasu ich użytkowania. Należy też pamiętać, że stosowanie wietrzenia wymaga dużej dyscypliny i w praktyce, niestety, wykonywane jest bardzo nieregularnie. Strumień powietrza zewnętrznego sięgający w czasie wietrzenia 1500–1700 m³/h może powodować w okresach niskich



Rysunek 3. Dystrybucja stężenia CO_2 dla sal lekcyjnych typowych usytuowanych na przedostatniej kondygnacji (linie ciągłe) i ostatniej kondygnacji (linie przerywane) dla wariantu 1 (a), wariantu 2 (b), wariantu 3 (c) i wariantu 4 (d). Źródło: opracowanie własne
Figure 3. Distribution of CO_2 concentration for typical classrooms located on the penultimate floor (continuous lines) and the last floor (dashed lines) for variant 1 (a), variant 2 (b), variant 3 (c) and variant 4 (d). Source: authors' own study

Tabela 3. Wskaźniki zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania i wentylacji oraz wskaźniki jakości powietrza. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Final energy demand indicators for heating and ventilation and air quality indicators. Source: authors' own study

Wskaźnik	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
	Wentylacja naturalna	Wentylacja naturalna dodatkowym wietrzeniem sal	Wentylacja mechaniczna ze stałym strumieniem powietrza	Wentylacja mechaniczna ze zmiennym strumieniem powietrza
$E_{k, ogrz+went (sale)}$, kWh/m ² ¹⁾	14,4	49,9	21,1	17,9
Zmiana $E_{k(sale)}$ w stosunku do wariantu poprzedniego 2→1, 3→2, 4→3	–	+ 247%	– 58%	– 15%
$E_{k, ogrz+went (budynek)}$, kWh/m ² ²⁾	10,9	29,2	19,1	18,0
$E_{elektryczna}$, kWh/m ² ²⁾	–	0,3	1,6	1,0
Zmiana $E_{k(budynek)}$ w stosunku do wariantu poprzedniego 2→1, 3→2, 4→3	–	+ 169%	– 35%	– 6%
Średnia liczba wymian powietrza w budynku, h ⁻¹	0,1	0,3	0,4	0,3
Średnie stężenie CO ₂ w salach lekcyjnych, ppm	3747	1265	905	938
Zmiana średniego stężenia CO ₂ w stosunku do wariantu poprzedniego 2→1, 3→2, 4→3	–	– 66%	– 28%	+ 4%
¹⁾ w odniesieniu do powierzchni sal lekcyjnych ²⁾ w odniesieniu do powierzchni całego budynku				

temperatur zewnętrznych znaczne lokalne obniżenia temperatury wewnętrznej, co może być źródłem dużego dyskomfortu w początkowych okresach lekcji.

Po wprowadzeniu systemu wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej (wariant 3) średniosezonowa liczba wymian w typowych salach lekcyjnych wzrosła, w stosunku do przypadku z otwieraniem okien, średnio o ok. 30%. W toaletach i innych pomieszczeniach nielekcyjnych liczba wymian powietrza zewnętrznego jest na tym samym poziomie co w wariantie 2 (system pozostał niezmienny). Maksymalna liczba wymian powietrza w salach lekcyjnych jest na poziomie 2,1 h⁻¹, co wynika z projektowego strumienia powietrza wentylacyjnego. Można również zauważyć spadek średniej liczby wymian w grudniu, lutym i kwietniu, co jest spowodowane przerwami świątecznymi lub feriami (w tych okresach system wentylacji mechanicznej nie był uruchamiany). W miesiącach, z wszystkimi tygodniami „pracującymi” liczba wymian jest praktycznie na stałym poziomie 0,6 h⁻¹.

W salach 30-osobowych stężenie CO₂ tylko nieznacznie przekracza 1200 ppm; w salach 25-osobowych maksymalna wartość nie przekracza 1200 ppm. Jakość powietrza wewnętrznego w salach 25-osobowych przez 100% czasu można zakwalifikować do co najmniej II kategorii środowiska; w sali bardziej obciążonej przez 85% czasu (Rysunek 3c). Najwyższą I kategorię środowiska można przypisać pomieszczeniom mniej obciążonym przez ok. 50% czasu ich użytkowania, bardziej obciążonym przez 30% czasu. Jakość powietrza w czasie lekcji jest na zdecydowanie lepszym poziomie niż w przypadku wietrzenia sal w czasie przerw (wariant II).

Po wprowadzeniu zmiennego strumienia powietrza w systemie wentylacji mechanicznej (wariant 4) średniosezonowa liczba wymian powietrza w typowych salach lekcyjnych zmniejszyła się, w stosunku do przypadku ze stałym strumieniem powietrza, o 26–38% w zależności od sali. Największy efekt (–45%) uzyskano w dużej kubatu-

rowo sali specjalnej, przy zapewnieniu jakości powietrza na podobnym poziomie. W godzinach użytkowania pomieszczeń przebieg zmienności strumienia powietrza pokrywa się z przebiegiem zmienności stężenia CO₂. W tym wariantie maksymalna liczba wymian powietrza w salach lekcyjnych jest na poziomie 2,5 h⁻¹, czyli jest większa od projektowego strumienia powietrza dla wariantu 3. Średni strumień powietrza dostarczany przez system wentylacji mechanicznej do sal typowych jest natomiast aż o 36% mniejszy od wartości projektowej wariantu 3 i wynosi 250 m³/h (1,3 h⁻¹). Dlatego też średniosezonowa liczba wymian w salach lekcyjnych jest zdecydowanie mniejsza w stosunku do wariantu 3, średnio o 32%.

W wariantie 4 jakość powietrza w salach lekcyjnych jest na bardzo dobrym poziomie. W żadnej z sal maksymalna wartość stężenia CO₂ nie przekracza poziomu II kategorii środowiska (1200 ppm) wg normy PN EN 16798-1 (PKN, 2019). Stężenia CO₂ w poszczególnych salach są do siebie bardzo zbliżone i ich wartości średnie różnią się w typowych salach o maksymalnie 125 ppm. W wariantie 3 różnice te były większe i wynosiły 175 ppm. System sterowania dostosowuje strumień powietrza do potrzeb, co daje korzyści zwłaszcza w salach bardziej obciążonych.

Najwyższą I kategorię środowiska można przypisać pomieszczeniom mniej obciążonym przez prawie 40% czasu ich użytkowania, bardziej obciążonym przez 25% czasu (Rysunek 3d). To kryterium wypadło nieco gorzej w porównaniu z wariantem 3. Jednak jakość środowiska we wszystkich salach zawsze spełnia kryteria kategorii II. Średnio jakość powietrza w czasie lekcji jest na podobnym poziomie jak w wariantie 3.

Zapotrzebowanie na ciepło

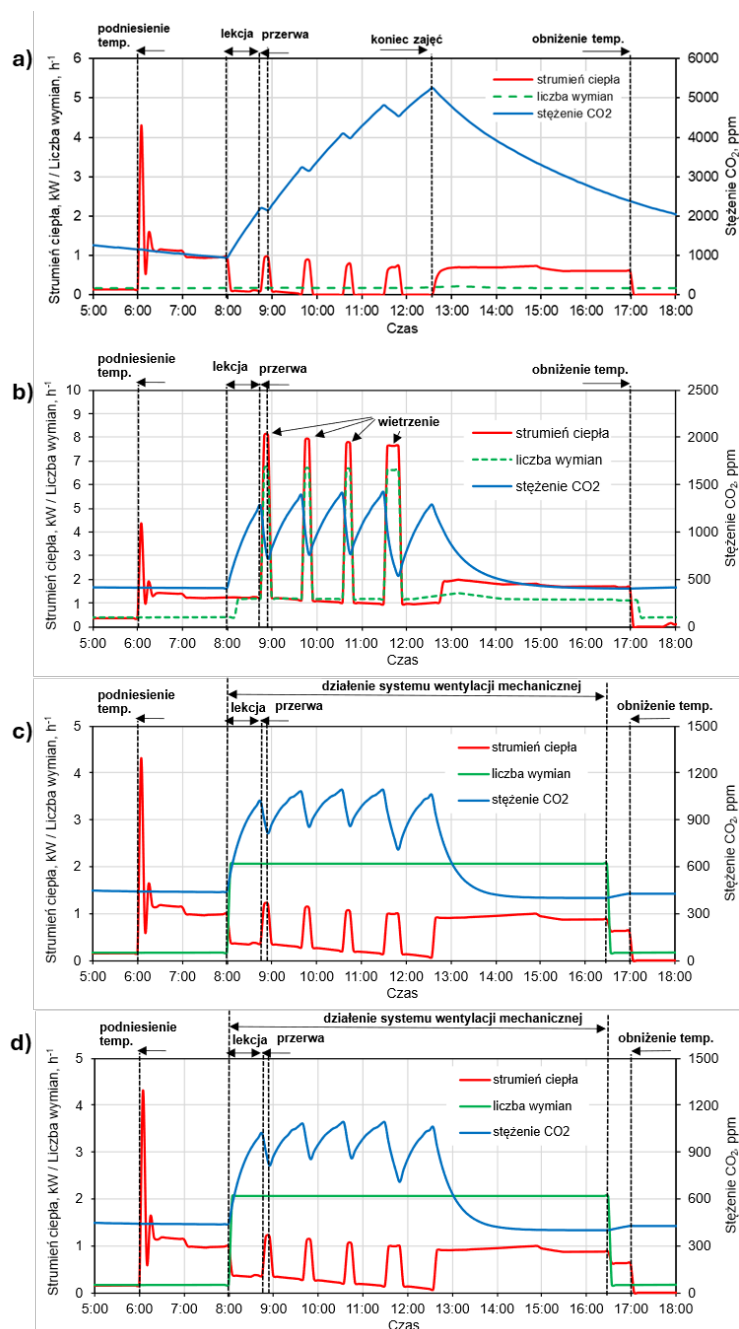
Tabela 3 zawiera wskaźniki energii końcowej oraz średniosezonową liczbę wymian powietrza w budynku. Z kolei, na Rysunku 4 zobrazowano chwilowy strumień powietrza, stężenie CO₂ i strumień ciepła dla rozpatrywa-

nych wariantów w jednym dniu stycznia w sali na ostatniej kondygnacji w której uczy się 25 uczniów.

W wariancie 1 (wentylacja grawitacyjna, szczelne okna) sezonowe zapotrzebowanie na ciepło budynku wynosi 23,7 MWh, co po uwzględnieniu sprawności systemu ogrzewania odpowiada wskaźnikowi energii końcowej na poziomie 11 kWh/m² w skali budynku. Należy jednak podkreślić, że tak niska energochłonność jest wynikiem bardzo małej intensywności wymiany powietrza (ok. 0,1 h⁻¹), a nie wysokiej efektywności energetycznej budynku. Chwilowe zapotrzebowanie na ciepło w salach lekcyjnych charakteryzuje się dużą zmiennością, wynikającą zarówno ze zmiennego obciążenia pomieszczeń, jak i zmian strumienia powietrza wentylacyjnego. Jak pokazano na Rysunku 4a, największe zapotrzebowanie występuje w godzinach porannych (ok. 6:00), po zakończeniu obniżenia nocnego, kiedy wymagane jest szybkie podniesienie temperatury wewnętrznej. Wprowadzenie obniżen nocnych i weekendowych temperatury do 18°C pozwala na uzyskanie ok. 22% oszczędności energii użytkowej. W okresach przejściowych (październik, kwiecień) umożliwia to nawet całkowite wyłączenie ogrzewania przez znaczną część czasu. Należy jednak uwzględnić zwiększone zapotrzebowanie na moc szczytową oraz możliwość chwilowego niedogrzanania pomieszczeń w godzinach porannych, które w przypadku sal lekcyjnych jest kompensowane przez zyski ciepła od użytkowników. W ciągu dnia obserwuje się spadki zapotrzebowania na ciepło związane z zyskami wewnętrznymi od użytkowników, natomiast w czasie przerw następuje jego ponowny wzrost. Zmienność ta jest skorelowana ze zmianami stężenia CO₂, które w warunkach szczelnej powłoki budynku nie obniża się do poziomu tła w godzinach nocnych, co powoduje pogorszenie jakości powietrza już na początku dnia użytkowania. Sytuacja pogarsza się na każdej kolejnej lekcji.

W wariancie 2 (wietrzenie i nawiewniki) obserwuje się istotny wzrost chwilowego zapotrzebowania na ciepło w okresach otwierania okien (Rysunek 4b). Napływ zimnego powietrza powoduje wzrost chwilowej mocy grzewczej nawet do ośmiokrotności wartości bazowej. W skali sezonu prowadzi to do około 2,5-krotnego wzrostu zużycia energii – wskaźnik energii końcowej jest na poziomie 29,2 kWh/m². Ta zmienność jest skorelowana ze zmianami stężenia CO₂. W czasie przerwy stężenie CO₂ spada znacząco, jednak cały czas pozostaje powyżej poziomu tła. Przy rozszczelnionych oknach stężenie CO₂ spada do poziomu tła w nocy, co nie było możliwe przy szczelnych oknach w wariancie 1. Wzrost zużycia energii jest bardziej znaczący w salach lekcyjnych i sięga prawie 50 kWh/m² na skutek konieczności podgrzania dużej ilości powietrza zewnętrznego. Dodatkowo w tym wariancie pojawia się zużycie energii elektrycznej związane z pracą wentylatorów wywiewnych (ok. 0,8 MWh). Należy podkreślić, że poprawa jakości powietrza w tym wariancie odbywa się kosztem bardzo wysokiej energochłonności oraz pogorszenia stabilności warunków cieplnych.

Zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (wariant 3) prowadzi do istotnej poprawy efektywno-



Rysunek 4. Przebieg zmienności chwilowego zapotrzebowania na ciepło, stężenia CO₂ i wymiany powietrza w przykładowej sali lekcyjnej (sala zachodnia na ostatniej kondygnacji – 25 osób) we wtorek 25.01 dla wariantów: 1 (a), 2 (b), 3 (c) i 4 (d). Źródło: opracowanie własne
Figure 4. Variation of instantaneous heat demand, CO₂ concentration and air change rates in an example classroom (western room on the top floor – 25 people) on Tuesday, January 25, for variants: 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d). Source: authors' own study

ści energetycznej przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej jakości powietrza. Pomimo zwiększenia strumienia powietrza wentylacyjnego, sezonowe zapotrzebowanie na ciepło sal lekcyjnych spada o ok. 55%. Odzysk ciepła stosowano tylko w salach lekcyjnych, natomiast inne usprawnienia wpływające na zwiększenie strumienia powietrza wprowadzono w budynku pozostały niezmienione w stosunku do wariantu 2, w związku z czym całkowite zapotrzebowanie na ciepło budynku spadło o 35%. W salach lekcyjnych redukcja zapotrzebowania na ciepło sięga ok. 55%. W okresach przejściowych możliwe jest okresowe wyłączenie ogrzewania. Wzrost zużycia energii elektrycz-

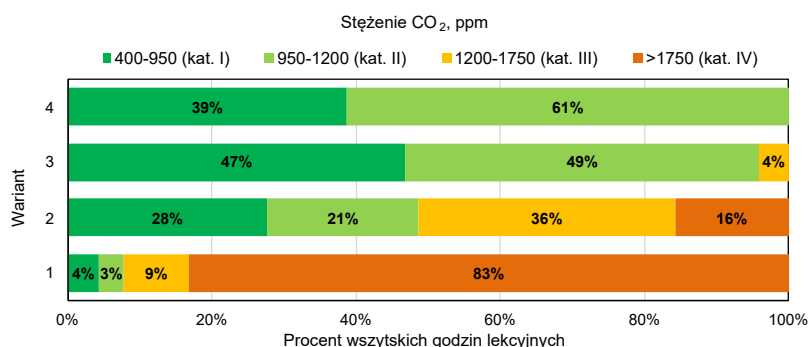
nej związany z pracą central wentylacyjnych i wentylatorów wywiewnych wynosi ok. 4,6 MWh w sezonie.

W wariancie 4 zastosowanie regulacji wydajności wentylacji w funkcji stężenia CO₂ pozwala na dalszą optymalizację zużycia energii. Średni strumień powietrza wentylacyjnego jest niższy niż w wariancie ze stałym przepływem, co przekłada się na redukcję zapotrzebowania na ciepło w salach lekcyjnych o ok. 16%. W skali całego budynku efekt ten wynosi ok. 6%, a wskaźnik sezonowe zapotrzebowania na ciepło wynosi około 18,0 kWh/m². Jednocześnie zużycie energii elektrycznej przez wentylatory zmniejsza się o ok. 45% i wynosi 2,8 MWh w sezonie.

Dyskusja

Czyste powietrze jest podstawowym wymaganiem dla ludzkiego zdrowia i samopoczucia. Kluczem dla ochrony zdrowia przed negatywnym wpływem zanieczyszczeń powietrza jest polepszenie działania wentylacji. Niestety aby ograniczyć zużycie energii często rozważa się możliwość zmniejszenia ilości powietrza, dlatego ważnym problemem jest znalezienie kompromisu między jakością powietrza wewnętrznego i zużyciem energii.

Na Rysunku 5 przedstawiono częstość występowania stężenia CO₂ w zakresach I, II i III kategorii jakości środowiska wewnętrznego jako procent sumarycznej liczby godzin z wszystkich 17 sal lekcyjnych w czasie ich użytkowania (tylko czas lekcji netto) w całym sezonie grzewczym od października do kwietnia. Wyniki wskazują wyraźnie na istotny wpływ przyjętej strategii wentylacji na jakość powietrza w salach lekcyjnych. W wariancie 1 (wentylacja grawitacyjna) zdecydowana większość czasu użytkowania pomieszczeń (ok. 83%) przypada na najniższą kategorię jakości powietrza (kat. IV >1750 ppm), co świadczy o bardzo złych warunkach środowiska wewnętrznego. Udział czasu, w którym spełnione są wymagania wyższych kategorii (I–II), jest znikomy (łącznie poniżej 10%). Szkoły podstawowe to zazwyczaj budynki niskie, a większość sal znajduje się na ostatnich kondygnacjach, gdzie długość przewodów wentylacji grawitacyjnej jest bardzo mała. W związku z czym stosowane w salach szkolnych systemy wentylacji naturalnej (szczególnie w okresach bezwietrznych) nie są w stanie zapewnić żądanej wymiany powietrza. Rozszczelnienie okien i wprowadzenie wietrzenia (wariant 2) prowadzi do istotnej poprawy jakości powietrza – udział czasu w kategorii IV spada do ok. 16%, jednak nadal przez ponad połowę czasu (ok. 52%) warunki odpowiadają kategoriom III i IV, co oznacza, że wymagania normowe nie są spełnione w sposób stabilny. Ponadto przewietrzanie powoduje znaczny wzrost chwilowej mocy grzewczej w pomieszczeniach, a w okresach niskich wartości temperatury zewnętrznej może powodować lokalne obniżenie temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach. Zastosowanie wentylacji mechanicznej (warianty 3 i 4) prowadzi do zdecydowanej poprawy jakości powietrza. W wariancie 3 ponad 95% czasu użytkowania przypada na kategorie I i II, przy czym niemal połowę stanowi najwyższa kategoria jakości powietrza. W wariancie 4 uży-



Rysunek 5. Rozkład stężenia CO₂ w różnych kategoriach środowiska wewnętrznego (łączna wartość ze wszystkich 17 sal lekcyjnych w trakcie ich użytkowania w sezonie grzewczym). Źródło: opracowanie własne
Figure 5. Distribution of CO₂ concentration in various indoor environment Categories (total value from all 17 classrooms during their use throughout the heating season). Source: authors' own study

skano jeszcze bardziej stabilne warunki – przez 100% czasu spełnione są wymagania co najmniej II kategorii, a dominującą część stanowi kategoria II (ok. 61%) oraz I (ok. 39%).

Jednak projektowanie systemów wentylacyjnych mechanicznej dla budynków szkolnych ma spore ograniczenia. Podstawowym problemem w wielu, nawet wysokorozwiniętych krajach, jest ograniczenie środków finansowych na ich realizację. Z reguły dofinansowanie można otrzymać na wymianę okien i docieplenie przegród zewnętrznych; pozostała część inwestycji – modernizacja systemu wentylacji musi zostać pokryta ze środków własnych (Duda, 2021; NFOŚiGW, 2024). Inwestycję pozwalającą na utrzymanie wysokiej jakości powietrza w istniejących budynkach szkolnych należy traktować jako konieczną dla zdrowia i dobrego samopoczucia uczniów. Taka modernizacja, dzięki możliwości stosowania odzysku ciepła z powietrza usuwanego w salach lekcyjnych, spowoduje zmniejszenie zapotrzebowania na energię końcową o ok. 35% w stosunku do przypadku z wietrzeniem. W czasie dnia sale charakteryzują się zmiennym obciążeniem, dlatego zastosowanie wentylacji mechanicznej ze zmiennym strumieniem powietrza dało dobre wyniki i pozwoliło w przypadku pojedynczych sal zaoszczędzić ok. 15% ciepła, przy utrzymaniu tak samo wysokiej jakości powietrza. Ponieważ powierzchnia sal lekcyjnych stanowi jedynie 33% powierzchni całego budynku, a czas użytkowania systemu wentylacji mechanicznej stanowi tylko 35% doby od poniedziałku do piątku, dlatego uzyskane oszczędności na ogrzewanie i wentylację całego budynku są na poziomie 6%.

Należy też podkreślić, że dodatkowa energia elektryczna związana z działaniem wentylatorów w bardzo małym stopniu wpływa na koszt utrzymania budynku; przy stałym strumieniu powietrza stanowi 10%, przy zmiennym 7% energii końcowej na ogrzewanie i wentylację. System wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła, stosowany wymiennie z wentylacją naturalną w okresach wolnych od zajęć, jest obecnie najlepszym sposobem zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w szkołach. System taki można stosować w salach lekcyjnych (i ze względów higienicznych w toaletach), w pozostałych pomieszczeniach wystarczająca jest wentylacja naturalna przy zastosowaniu nawiewników okiennych.

Dodatkowym źródłem oszczędności energii jest stosowa-

nie obniżen temperatury w godzinach nocnych i w weekendy. Ze wzgledu na specyfikę użytkowania budynków szkolnych, charakteryzujących się wyraźnie określonymi godzinami eksploatacji oraz długimi okresami nieużytkowania, rozwiązanie to należy uznać za w pełni uzasadnione energetycznie. W analizowanym przypadku wykazano, że pozwala ono na redukcję zużycia energii przekraczającą 20%. W okresach, w których budynek pozostaje nieużytkowany (po godzinach popołudniowych oraz w dni wolne), utrzymywanie temperatury komfortu nie jest konieczne, co uzasadnia wprowadzenie harmonogramów regulacji temperatury.

Wnioski

1. Wentylacja grawitacyjna w budynkach szkolnych po termomodernizacji nie zapewnia wymaganej jakości powietrza wewnętrznego. Zastosowanie szczelnej stolarki okiennej prowadzi do istotnego ograniczenia infiltracji, co skutkuje bardzo niską intensywnością wymiany powietrza oraz przekroczeniami dopuszczalnych stężeń CO₂. Uzyskiwane w takich warunkach niskie zużycie energii ma charakter pozorny i nie powinno być traktowane jako miara efektywności energetycznej budynku.
2. Wietrzenie pomieszczeń nie stanowi efektywnej alternatywy dla systemowej wentylacji. Praktyka polegająca na okresowym otwieraniu okien prowadzi do znacznych, krótkotrwałych wzrostów mocy grzewczej (nawet kilkukrotnych), pogorszenia komfortu cieplnego oraz wysokiego zużycia energii. Jednocześnie nie zapewnia stabilnej jakości powietrza – stężenie CO₂ w dalszym ciągu przekracza wartości zalecane.
3. Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła jest rozwiązaniem optymalnym z punktu widzenia projektowego. Umożliwia ona utrzymanie stężenia CO₂ na poziomie ok. 1000 ppm przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii w porównaniu z wariantem opartym na wietrzeniu. Dodatkowe zużycie energii elektrycznej przez wentylatory ma niewielki udział w bilansie energetycznym i nie stanowi istotnej bariery eksploatacyjnej.
4. Zastosowanie regulacji wydajności wentylacji (np. w funkcji stężenia CO₂) oraz harmonogramów temperatury stanowi kluczowy element optymalizacji energetycznej. Systemy o zmiennym strumieniu powietrza pozwalają na dalsze ograniczenie zużycia energii przy zachowaniu wymaganej jakości powietrza, natomiast stosowanie obniżen temperatury w okresach nieużytkowania budynku umożliwia redukcję zapotrzebowania na energię przekraczającą 20%. W związku z tym kompleksowa modernizacja budynków szkolnych powinna obejmować zarówno poprawę izolacyjności przegród, jak i wdrożenie zaawansowanych systemów wentylacji i sterowania.

Podziękowania

Praca była wspierana w ramach subwencji badawczej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Politechniki Śląskiej w 2026 roku.

Bibliografia

- Amanowicz, Ł., Ratajczak, K., & Szczechowiak, E. (2019). Analiza możliwości stosowania systemu wentylacji zdecentralizowanej w budynkach edukacyjnych. *Instal*, (10), 20–26. <https://doi.org/10.36119/15.2019.10.3>
- ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): Atlanta, GA, USA.
- Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment: Comparison of ventilation scenarios for retrofitting classrooms in a hot climate. *Energies*, 12(24), 4607. <https://doi.org/10.3390/en12244607>
- Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2021). Indoor environmental assessment: Comparing ventilation scenarios in pre- and post-retrofitted dwellings through test cells. *Journal of Building Engineering*, 43, 103148. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103148>
- Coggins, A. M., Wemken, N., Mishra, A. K., Sharkey, M., Horgan, L., Cowie, H., Bourdin, E., & McIntyre, B. (2022). Indoor air quality, thermal comfort and ventilation in deep energy retrofitted Irish dwellings. *Building and Environment*, 219, 109236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109236>
- Duda, L. (2021). Wentylacja szkół – warunek konieczny dla rozwoju Polski. Rynek Instalacyjny, 1–2.
- Ferdyn-Grygierek, J., Baranowski, A., Blaszczyk, M., & Kaczmarczyk, J. (2019). Thermal Diagnostics of natural ventilation in Buildings: an Integrated approach. *Energies*, 12(23), 4556. <https://doi.org/10.3390/en12234556>
- Fix, A. J., Pamintuan, B. C., Braun, J. E., & Warsinger, D. M. (2022). Vapor-selective active membrane energy exchanger with mechanical ventilation and indoor air recirculation. *Applied Energy*, 312, 118768. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118768>
- Grygierek, K., Nateghi, S., Ferdyn-Grygierek, J., & Kaczmarczyk, J. (2023). Controlling and Limiting Infection Risk, Thermal Discomfort, and Low Indoor Air Quality in a Classroom through Natural Ventilation Controlled by Smart Windows. *Energies*, 16(2), 592. <https://doi.org/10.3390/en16020592>
- Heebøll, A., Wargocki, P., & Toftum, J. (2018). Window and door opening behavior, carbon dioxide concentration, temperature, and energy use during the heating season in classrooms with different ventilation retrofits—ASHRAE RP1624. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(6), 626–637. <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1432938>
- Li, C., Cui, C., & Li, M. (2022). A proactive 2-stage indoor CO₂-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency. *Applied Energy*, 329, 120288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120288>

- Măgurean, A. M., & Petran, H. A. (2023). Analysis of Measured CO₂ Levels through Long-Term Monitoring in Renovated Multifamily Buildings: A Common Case. *Buildings*, 13(8), 2113. <https://doi.org/10.3390/buildings13082113>
- McGill, G., Oyedele, L. O., & McAllister, K. (2015). Case study investigation of indoor air quality in mechanically ventilated and naturally ventilated UK social housing. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 58–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.03.002>
- Merema, B., Delwati, M., Sourbron, M., & Breesch, H. (2018). Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies. *Energy and Buildings*, 172, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.065>
- Minister Infrastruktury i Rozwoju. (2015). Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 poz. 376, ze zm.).
- Minister Rozwoju i Technologii. (2022). Obwieszczenie z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2022 poz. 1225).
- NFOŚiGW (2024). B1.1.3 Wymiana źródeł ciepła i poprawa efektywności energetycznej szkół. Program Priorytetowy „Wymiana źródeł ciepła i poprawa efektywności energetycznej szkół” *Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej*.
- Otoo, C., Lu, T., & Lü, X. (2024). Application of Mixed-Mode ventilation to enhance indoor air quality and energy efficiency in school buildings. *Energies*, 17(23), 6097. <https://doi.org/10.3390/en17236097>
- Park, J., & Kim, H. (2012). A field study of occupant behavior and energy consumption in apartments with mechanical ventilation. *Energy and Buildings*, 50, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.015>
- Pereira, P. F., Ramos, N. M., Almeida, R. M., Simões, M. L., & Barreira, E. (2017). Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions. *Energy Procedia*, 132, 837–842. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.669>
- Persily, A., & De Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki – Moduł M1-6. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- Popiołek, Z. (Ed.). (2013). Poradnik diagnostyki cieplnej budynków (tom 5). *Politechnika Śląska*.
- Rizzo, K., Camilleri, M., Gatt, D., & Yousif, C. (2024). Optimising mechanical ventilation for indoor air quality and thermal comfort in a Mediterranean school building. *Sustainability*, 16(2), 766. <https://doi.org/10.3390/su16020766>
- Stabile, L., Massimo, A., Canale, L., Russi, A., Andrade, A., & Dell’Isola, M. (2019). The effect of ventilation strategies on indoor air quality and energy consumptions in classrooms. *Buildings*, 9(5), 110. <https://doi.org/10.3390/buildings9050110>
- Typowe lata meteorologiczne. Dostęp online <https://dane.gov.pl/dataset/797,typowe-lata-meteorologiczne-i-statystyczne-dane-klimatyczne-dla-obszaru-polski-do-obliczen-energetycznych-budynkow>
- Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J., & Hutter, H. (2015). Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings. Wentylacja szkół – warunek konieczny dla rozwoju Polski. *Rynek Instalacyjny*, 12(11), 14132–14147. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114132>
- Ye, Y., Chen, Y., Zhang, J., Pang, Z., O’Neill, Z., Dong, B., & Cheng, H. (2021). Energy-saving potential evaluation for primary schools with occupant-centric controls. *Applied Energy*, 293, 116854. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116854>
- Zhang, S., Ai, Z., & Lin, Z. (2021). Novel demand-controlled optimization of constant-air-volume mechanical ventilation for indoor air quality, durability and energy saving. *Applied Energy*, 293, 116954. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116954>
- Zhuang, C., Shan, K., & Wang, S. (2021). Coordinated demand-controlled ventilation strategy for energy-efficient operation in multi-zone cleanroom air-conditioning systems. *Building and Environment*, 191, 107588. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107588>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.