



STRESZCZENIE RAPORTU Z BADANIA JAKOŚCI POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO W SALACH LEKCYJNYCH

Autorzy streszczenia:
dr inż. Sławomira Dumąła
dr inż. Mariusz Skwarczyński

styczeń 2023

Spis treści

1.	WPROWADZENIE	2
1.1.	Cel badania	2
1.2.	Zakres badania	2
1.3.	Dwutlenek węgla (CO ₂)	2
1.4.	VOC i formaldehyd	4
1.5.	PM2.5 i PM10	5
1.6.	Bibliografia.....	5
2.	CZĘŚĆ BADAWCZA	7
2.1.	Metoda badawcza	7
3.	SZKOŁA PODSTAWOWA.....	8
3.1.	Opis obiektu	8
3.2.	Wyniki.....	12
3.2.1.	SALA A	12
3.2.2.	SALA B	15
3.2.3.	SALA C	18
3.3.	Dyskusja wyników	21
4.	PRZEDSZKOLE.....	23
4.1.	Opis obiektu	23
4.2.	Wyniki.....	25
4.3.	Dyskusja wyników	27
5.	SZKOŁA WYŻSZA	29
5.1.	Opis obiektu	29
5.2.	Wyniki.....	31
5.3.	Dyskusja wyników	34
6.	PODSUMOWANIE	35

Treść streszczenia wraz z posumowaniem opracowano na podstawie *Raportu z badania jakości powietrza wewnętrznego w salach lekcyjnych* oraz *Raportu stanowiącego przegląd literatury w zakresie dotychczas przeprowadzonych badań w szkołach na terenie Polski pod kątem stężenia dwutlenku węgla*.

1. WPROWADZENIE

1.1. Cel badania

Celem niniejszego opracowania był monitoring jakości powietrza wewnętrznego przeprowadzony dla następujących klas szkolnych (grup wiekowych):

1. IV-VIII lub w salach lekcyjnych uczelni wyższych (uczniowie korzystali z sali lekcyjnej według planu lekcyjnego – ta sama klasa użytkuje pomieszczenie max. 2 h lekcyjne),
2. I-III (uczniowie przebywają w sali lekcyjnej przez wszystkie lekcje, wychodzą z niej jedynie na przerwach),
3. przedszkole lub zerówka „0” (uczniowie praktycznie przez cały dzień są w jednym i tym samym pomieszczeniu).

Wybór sal lekcyjnych podyktowany był sposobem ich użytkowania. Badania zrealizowane zostały w ramach Przedsięwzięcia „Wentylacja dla szkół i domów” przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

1.2. Zakres badania

W ramach poszczególnych pomiarów przeprowadzono pomiar stężenia CO₂, koncentracji cząstek PM_{2.5} i PM₁₀, formaldehydu, lotnych związków organicznych LZO wraz z monitorowaniem zmian temperatury i wilgotności powietrza w sali lekcyjnej.

1.3. Dwutlenek węgla (CO₂)

Dwutlenek węgla to bezbarwny, bezwonny, niepalny gaz naturalnie występujący w powietrzu atmosferycznym. Jest efektem procesu metabolizmu organizmów i stanowi składnik wydychanego powietrza. Powstaje również w wyniku spalania paliw kopalnych i ze źródeł naturalnych, takich jak erupcje wulkaniczne. Poziomy CO₂ w powietrzu zewnętrznym zwykle waha się od 300 do 400 ppm (0,03% do 0,04%), ale może sięgać nawet 600-900 ppm na obszarach zurbanizowanych. Chociaż najczęściej występuje jako gaz, CO₂ może również występować w postaci stałej (suchy lód).

Dwutlenek węgla zawarty w powietrzu rozpuszcza się we krwi i reagując z wodą tworzy kwas węglowy (H₂CO₂). Ten zaś dysocjuje na jony: wodorowy [H⁺] i wodorowęglanowy [HCO₃⁻]. Wzrost ilości jonów wodorowych prowadzi z kolei do zakwaszania krwi i zaburzenia równowagi elektrolitów, a w efekcie do pogorszenia naszego samopoczucia i obniżenia aktywności. Objawy łagodnego narażenia na CO₂ mogą powodować ból głowy i senność. Na wyższych poziomach,

słyca oddech i zwiększa szybkość oddychania, powoduje dezorientację, podwyższa ciśnienie krwi. Wdychanie powietrza zubożonego w tlen spowodowane ekstremalnymi stężeniami CO₂ może prowadzić do śmierci. Przykładowo w 2013 r. Fisk i współautorzy przeprowadzili eksperyment. Poddali uczestników 2,5 godzinnemu narażeniu na podwyższone stężenie CO₂. Okazało się, że już przy stężeniu 1000 ppm odnotowano obniżenie zdolności intelektualnych, a przy 2500 ppm inicjatywa i myślenie strategiczne uczestników zmniejszyły się do poziomu dysfunkcyjnego.

Obecnie Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji (ASHRAE) zaleca, aby poziomy CO₂ był utrzymywany poniżej 1000 ppm. Wartość taka jest też rekomendowana jako dopuszczalna przez normę europejską CEN 1752 Ventilation For Buildings – Design Criteria for Indoor Environment. Z kolei niemiecka norma DIN 1946-2 wskazuje wartość 1500 ppm. Natomiast polska norma PN-EN 15251:2012 - dzieli pomieszczenia wg klas w zależności od wartości stężenia CO₂ w odniesieniu do wartości panującej w powietrzu zewnętrznym. Jakość środowiska wewnętrznego sklasyfikowano w niej na 4 kategorie:

- **kategoria I** – warunki na wysokim poziomie, kategoria zalecana w pomieszczeniach, w których przebywać będą osoby bardzo wrażliwe na warunki środowiska i mało odporne na wystąpienie dyskomfortu (osoby niepełnosprawne, chorzy, niemowlęta, ludzie w podeszłym wieku itp.);
- **kategoria II** – poziom normalny, kategoria zalecana w budynkach nowo wznoszonych lub remontowanych;
- **kategoria III** – warunki na średnim, ale jeszcze akceptowalnym poziomie oczekiwań; kategoria może być przyjmowana w istniejących budynkach;
- **kategoria IV** – warunki nie spełniają kryteriów kategorii I – III; takie odstępstwo może być akceptowane jedynie wówczas, gdy będzie występować w ciągu roku tylko w ograniczonym czasie.

Wynika z tego, że w przypadku modernizowanych szkół mamy do czynienia z kategorią II, a co za tym idzie poziom CO₂ powinien wynosić 500 ppm powyżej warunków zewnętrznych (czyli w większości przypadków poniżej 1000 ppm).

Zakładając, że człowiek wydziela 18 dm³/h CO₂, zawartość w powietrzu zewnętrznym wynosi 400 ppm, a dopuszczalne jego stężenie w powietrzu to 1000 ppm, to niezbędna ilość powietrza wentylacyjnego wynosi $V=0,018/(0,001-0,0004)=30$ dm³/h.

Wyniki badań wskazują, że poziom CO₂ w pomieszczeniach mieszkalnych, szkolnych i przedszkolnych osiągał wartości sześciokrotnie przewyższające stężenie zewnętrzne (Chmielewski 2011, Gładyszewska-Fedoruk 2011, Cichowicz i in. 2015, Mainka i Zajusz-Zubek 2015), w niewentylowanych audytoriach uczelnianych 7000 ppm (Cichowicz i in. 2014). Sytuację paradoksalnie pogarsza lepsza jakość okien o regulowanej szczelności (Chmielewski 2012, Murkowski i Skórska 2016).

1.4. VOC i formaldehyd

Lotne związki organiczne LZO (ang. Volatile Organic Compounds VOC) to naturalnie występujące węglowodory, które odparowują w temperaturze pokojowej, co oznacza, że mają wysoką lotność fotochemiczną lub reaktywność fotochemiczną. Zakres emisji lotnych związków organicznych różni się w zależności od danego związku. Niektóre odparowują bardziej niż inne i dlatego stanowią większe ryzyko. Agencja Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (EPA) stworzyła listę lotnych związków organicznych, klasyfikując je według stopnia lotności:

- bardzo lotne związki organiczne (ang. Very Volatile Organic Compounds VVOC),
- lotne związki organiczne LZO (ang. Volatile Organic Compounds VOC),
- półlotne związki organiczne (ang. Semi-Volatile Organic Compounds SVOC).

Stanowią 60% wszystkich substancji zanieczyszczających, a 73% spośród nich znajduje się na liście związków rakotwórczych (Zabiegała 2009).

W regulacjach brak jest jednoznacznych informacji związanych z granicznym poziomem VOC w powietrzu wewnętrznym. Publikowane wartości dotyczą emisji z konkretnych materiałów budowlanych, wykończenia wnętrza, mebli, czy sprecyzowanej substancji chemicznej.

Zalecane parametry dotyczące budynków o niskiej i bardzo niskiej emisji zanieczyszczeń wg PN-EN 15251:2012 Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas zestawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Poziom emisji zanieczyszczeń VOC z materiałów (PN-EN 15251:2012)

Cechy	Budynek o niskiej emisji zanieczyszczeń	Budynek o bardzo niskiej emisji zanieczyszczeń
Emisja lotnych związków organicznych z materiałów	< 0,2 [mg/(m ² h)]	< 0,1 [mg/(m ² h)]
Emisja formaldehydu z materiałów	< 0,05 [mg/(m ² h)]	< 0,02 [mg/(m ² h)]

Budynek o niskiej emisji zanieczyszczeń powinien być zrealizowany z materiałów spełniających wymagania zestawione w tabeli 1.1.

Formaldehyd w warunkach normalnych jest bezbarwnym gazem o charakterystycznym gryzącym zapachu. W przypadku zatrucia przewlekłego może powodować zapalenie oskrzeli (u osób nadwrażliwych - astmę oskrzelową), świąd skóry i jej podrażnienie oraz wyprysk alergiczny (Pośniak, 1999). Wiąże się go obecnie m.in. z zachorowaniami na nowotwory. Formaldehyd jest istotnym czynnikiem zanieczyszczającym powietrze w pomieszczeniach mieszkalnych i biurowych. Źródłem emisji tego związku są płyty wiórowe, paździerzowe i pilśniowe stosowane w elementach konstrukcyjnych, wykończeniowych i wyrobach meblarskich oraz lakiery, farby, kleje, niektóre rodzaje tapet i wykładzin podłogowych, materiały izolacyjne z wełny mineralnej oraz upłynniacze do betonu użyte w procesie budowlanym. Formaldehyd jest także składnikiem dymu tytoniowego i ocenia się, że w 1 m³ dymu występuje 40 cm³ formaldehydu (ECETOC 1981).

Według Międzynarodowej Organizacji Zdrowia i informacji zawartych w *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants* należy zachować stężenie formaldehydu poniżej $0,1 \text{ mg/m}^3$. Natomiast zgodnie z Zarządzeniem Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 12 marca 1996 r. w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi – $50 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ($0,05 \text{ mg/m}^3 \sim 0,041 \text{ ppm} = 41 \text{ ppb}$) dla pomieszczeń kategorii A i $100 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ($0,1 \text{ mg/m}^3 \sim 0,081 \text{ ppm} = 81 \text{ ppb}$) dla kategorii B.

1.5. PM2.5 i PM10

Pyły to mieszanina cząstek stałych i ciekłych zawieszonych w powietrzu. W literaturze pyły sklasyfikowano na frakcje grube, drobne i ultradrobne. Drobne cząsteczki PM2.5 to te, które mają średnicę mniejszą niż 2.5 mikrometra (ponad 100 razy cieńsze niż ludzki włos) i pozostają w powietrzu przez dłuższy czas. Stanowią zagrożenie dla zdrowia, ponieważ mogą przedostać się głęboko do dróg oddechowych, docierając do płuc i do krwiobiegu.

Większość badań wskazuje, że stężenie PM2.5 na poziomie poniżej $12 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ lub poniżej uważane jest za nieszkodliwe i stanowi niewielkie zagrożenie. Jeśli poziom wzrośnie do lub przekroczy $35 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ w ciągu 24 godzin, powietrze jest uważane za niezdrowe i może powodować dolegliwości u osób z istniejącymi problemami z oddychaniem (m.in. wśród astmatyków). Długotrwałe narażenie na poziomy powyżej $50 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ może prowadzić do poważnych problemów zdrowotnych i przedwczesnej śmierci. Dlatego IAHI (Indoor Air Hygiene Institute) rekomenduje, aby poziom PM2.5 wynosił poniżej $12 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ lub mniej, z rzadkimi skokami lub bez skoków na poziomie $35 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ lub wyższym. Natomiast ASHRAE dla PM2.5 w powietrzu wewnętrznym zaleca wartość graniczną wynoszącą $35 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ niezależnie od typu budynku.

Według WHO maksymalne stężenie średnioroczne PM2.5 w powietrzu zewnętrznym nie powinno przekraczać $5 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (wcześniej było to $10 \text{ }\mu\text{g/m}^3$), stężenie dobowe - $15 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (wcześniej było to $25 \text{ }\mu\text{g/m}^3$). Natomiast, maksymalne stężenie średnioroczne PM10 nie powinno przekraczać $15 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (wcześniej było to $20 \text{ }\mu\text{g/m}^3$), stężenie dobowe - $45 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (wcześniej było to $50 \text{ }\mu\text{g/m}^3$).

1.6. Bibliografia

1. Chmielewski K., 2011. Świeże powietrze w domu, szkole i pracy. Bud. Inż. Środ. 2, 443-447.
2. Chmielewski K. 2012. Jakość powietrza w budynkach a wentylacja powietrza. Install Reporter 3, 54-55.
3. Cichowicz R., Gawron-Skarbek A., Godala M., Zimna-Walendzik E., Sabiniak H., Szatko F., 2014. Ocena stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wybranych pomieszczeń uczelni wyższej. Probl. Hig. Epidemiol. 95, 287-291.
4. Cichowicz R., Sabiniak H., Wielgosiński G., 2015. The influence of a ventilation on the level of carbon dioxide in a classroom at a higher university. Ecol. Chem. Eng. S 22, 61-71.
5. ECETOC, 1981. Assessment of data and the effects on formaldehyde on humans. Technical report no 1. Bruksela, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals.

6. Fisk W. J., Satish U., Mendel M. J., Hotchi T., Sullivan D., 2013. Is CO₂ an indoor pollutant? Higher levels of CO₂ may diminish decision making performance. REHWA 10, 63.
7. Gładyszewska-Fedoruk K., 2011. Analysis of stack ventilation system effectiveness in an average kindergarten in north-eastern Poland. Energy Build. 43, 2488-2493.
8. Mainka A., Zajusz-Zubek E., 2015. Indoor air quality in urban and rural preschools in upper Silesia, Poland: particulate matter and carbon dioxide. Int. J. Environ. Res. Public Health, 12, 7697-7711.
9. Murkowski A., Skórska E., 2016. Czy zwiększona zawartość dwutlenku węgla w powietrzu ma wpływ na sprawność intelektualną człowieka?. Kosmos. Problemy nauk biologicznych, 313, 631–636.
10. M. Pośniak, Formaldehyd - metoda oznaczania, PIMOŚ, 1999, nr 22, s. 96-100.
11. Zabiegała, B., 2009. Jakość powietrza wewnętrznego - lotne związki organiczne jako wskaźnik jakości powietrza wewnętrznego. Indoor air quality - volatile organic compounds as an indicator of the quality of indoor air. Polska Inżynieria Środowiska pięć Lat Po wstąpieniu Do Unii Europejskiej, T. 2, T. 2, 303-315.
12. CEN 1752 Ventilation for buildings - Design criteria for the indoor environment.
13. DIN EN 1946-2 Thermal performance of building products and building components - Specific criteria for the assessment of laboratories measuring heat transfer properties - Part 2: Measurements by guarded hot plate method PN-EN 15251:2012.
14. PN-EN 15251:2012 Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas.
15. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.

2. CZĘŚĆ BADAWCZA

2.1. Metoda badawcza

Pomiary przeprowadzono za pomocą mierników IAQmeter (rys. 2.1), umożliwiających ciągły pomiar i rejestrację. Urządzenia zainstalowano w salach lekcyjnych i na korytarzu szkolnym, w strefie oddychania użytkowników. Do pomiaru stężenia CO₂ w powietrzu zewnętrznym posłużono się przenośnym miernikiem pSENSE.

Dodatkowo spisywano liczbę użytkowników i ewentualne czynności mogące wpłynąć na uzyskany wynik (m.in. otwieranie okien). Nauczycieli poproszono o prowadzenie dziennika aktywności i sposobu użytkowania pomieszczenia. Informacje posłużyły do zweryfikowania uzyskanych wyników, wyeliminowania ewentualnych błędów pomiarowych, a co za tym idzie prawidłowego sformułowania wniosków.



Rys. 2.1 Miernik IAQmeter

Miernik IAQmeter posiada możliwość ciągłej rejestracji następujących parametrów jakości powietrza:

- temperatury powietrza,
- wilgotności względnej powietrza,
- stężenia formaldehydu,
- stężenia CO₂,
- stężenia VOC,
- koncentracji cząstek: PM10, PM2.5.

3. SZKOŁA PODSTAWOWA

3.1. Opis obiektu

Badania przeprowadzono w szkole objętej termomodernizacją (Rys. 3.1). Prace dociepleniowe oraz wymianę stolarki okiennej przeprowadzono 5 lat temu. Szkoła powstała w 1915 r. i zlokalizowana jest w centrum miasta liczącego powyżej 300 tys. mieszkańców (Tabela 3.1.).



Rys. 3.1. Widok szkoły podstawowej po termomodernizacji

Tabela 3.1. Dane o obiekcie

Powierzchnia użytkowa [m ²]	Kubatura [m ³]	Liczba kondygnacji
		nadziemnych
4 536	17 561	2
Powierzchnia ogrzewana [m ²]	Kubatura ogrzewana [m ³]	podziemnych
4 184	17 005	1

Wentylacja obiektu: Większość pomieszczeń szkoły wyposażona jest w układ wentylacji wywiewnej grawitacyjnej z nawiewem powietrza odbywającym się na zasadzie podciśnienia przez okna i drzwi. Skuteczność działania układów jest słaba i zależy w dużym stopniu od warunków atmosferycznych panujących na zewnątrz (temperatura, ciśnienie), wysokości kanałów wentylacyjnych. Stan techniczny kanałów grawitacyjnych w kominach murowanych jest dobry, są drożne, co potwierdza protokół kominiarski (informacje z aktualnego raportu okresowego przeglądu szkoły).

Instalacja centralnego ogrzewania: obliczeniowe zapotrzebowanie ciepła 243 884 W, 13,89 W/m³, 53,77 W/m², instalacja wodna 85/60°C, z rozdziałem dolnym, pracująca w układzie zamkniętym, zasilana z sieci miejskiej, z grzejnikami płytowymi. Dwufunkcyjny węzeł wymiennikowy.

Ściany zewnętrzne: z cegły dziurawki docieplone wełną mineralną, lamelową o grubości $d = 14$ cm i współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda = 0,042$ W/(mK), co zagwarantowało współczynnik przenikania ciepła $U = 0,241$ W/(m²K), czyli zgodnie z ówczesnie obowiązującym Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dla ściany zewnętrznej z żużlobetonu $U = 0,238$ W/(m²K).

Stropodach: docieplono płytami PIR $\lambda = 0,025$ W/(mK), $d = 12$ cm, $U = 0,167$ W/(m²K).

Okna: PCV wyposażone w nawiewniki higrosterowane $U = 1,3$ W/(m²K).

Pomiary przeprowadzono w następujących salach lekcyjnych (Tabela 3.2.):

SALA A: sala lekcyjna przeznaczona do organizacji zajęć lekcyjnych dla klas IV-VIII - (uczniowie korzystają z sali według planu lekcyjnego) – rys. 3.2,

SALA B: sala lekcyjna przeznaczona do organizacji zajęć lekcyjnych dla klas I – III (uczniowie przebywają w sali przez wszystkie lekcje, wychodzą z sali jedynie na przerwach) – rys. 3.3,

SALA C: sala lekcyjna przeznaczona do organizacji zajęć dla klasy „0” – rys. 3.4.

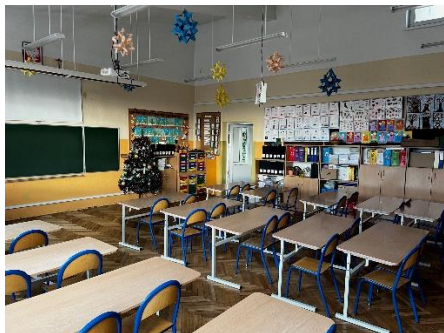
Tabela 3.2. Dane ogólne dla sal objętych badaniem

Klasa	SALA A	SALA B	SALA C
Kondygnacja	parter	1 piętro	parter
Strona świata	SE	SE	SW
Powierzchnia, m ²	57	58,5	40
Kubatura, m ³	188	236,6	132
Liczba i wymiar okien	3 okna zewnętrzne z nawiewnikami higrosterowanymi, 2,3x2m z roletami wewnętrznymi w ciemnym kolorze; 3 okna wewnętrzne 0,8x1,80m	3 okna zewnętrzne z nawiewnikami higrosterowanymi, 2,3x2m z roletami wewnętrznymi w ciemnym kolorze; 1 okno wewnętrzne 0,8x1,80m	2 okna zewnętrzne z nawiewnikami higrosterowanymi, z roletami wewnętrznymi w ciemnym kolorze, jedno okno o wymiarze 2,3x2m, drugie 3x2m
Drzwi wewnętrzne	1x2m	1x2m	0,9x2m
Wyposażenie	30 poj. ławek, 31 krzesel, biurko, komputer, tablica, projektor, ekran, 6 regałów, 2 tablice wystawowe	14 podwójnych ławek, 29 krzesel, biurko, komputer, projektor, tablica trzyskrzydłowa, ekran, 15 regałów, komoda, 7 tablic wystawowych	9 komód, 5 regałów, 9 stolików w kształcie trapezu, 26 krzesel, biurko, tablica, 4 tablice wystawowe, tv

Oświetlenie	12 opraw oświetleniowych o dł. 120cm przymocowanych do sufitu, 1 lampa wisząca wzdłuż tablicy	12 opraw oświetleniowych o dł. 120cm zwieszonych z sufitu, 2 lampy wiszące wzdłuż tablicy	6 opraw oświetleniowych o dł. 120cm przymocowanych do sufitu
Podłoga i wykończenie ścian	Na podłodze parkiet drewniany, ściany do połowy pomalowane farbą olejną, druga połowa farba lateksowa	Na podłodze parkiet drewniany, ściany do połowy pomalowane farbą olejną, druga połowa farba lateksowa	Na podłodze parkiet drewniany, ściany do połowy pomalowane farbą olejną, druga połowa farba lateksowa, dywan na jednej połowie sali
Grzejniki	3 grzejniki stalowe płytowe z ozdobnymi osłonami (2 grzejniki pod oknami zewn., 1 wzdłuż ściany wew. na końcu klasy)	3 grzejniki stalowe płytowe z ozdobnymi osłonami pod oknami zewn.	1 grzejnik płytowy podwójny z ozdobną osłoną – na ścianie wewnętrznej



Rys. 3.2. Widok Sali A



Rys. 3.3. Widok Sali B



Rys. 3.4. Widok Sali C

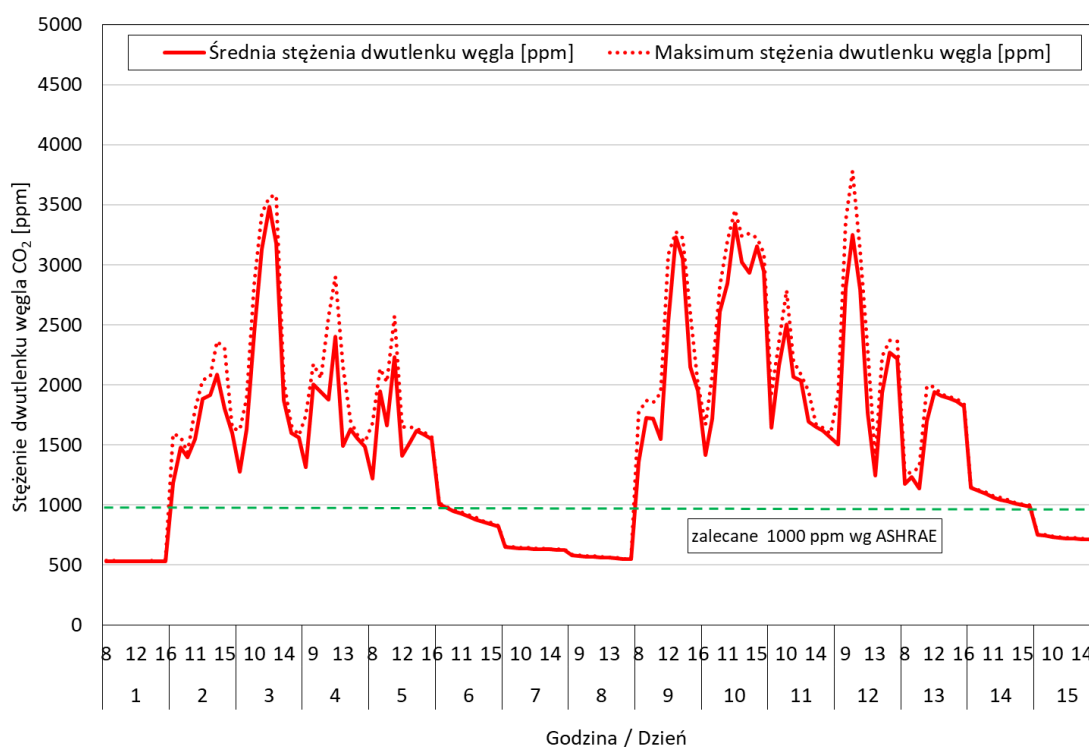


3.2. Wyniki

Pomiary zostały przedstawione w formie wykresów dla poszczególnych sal lekcyjnych: SALA A, SALA B, SALA C oraz wybranych zanieczyszczeń wyszczególnionych w zakresie niniejszego opracowania.

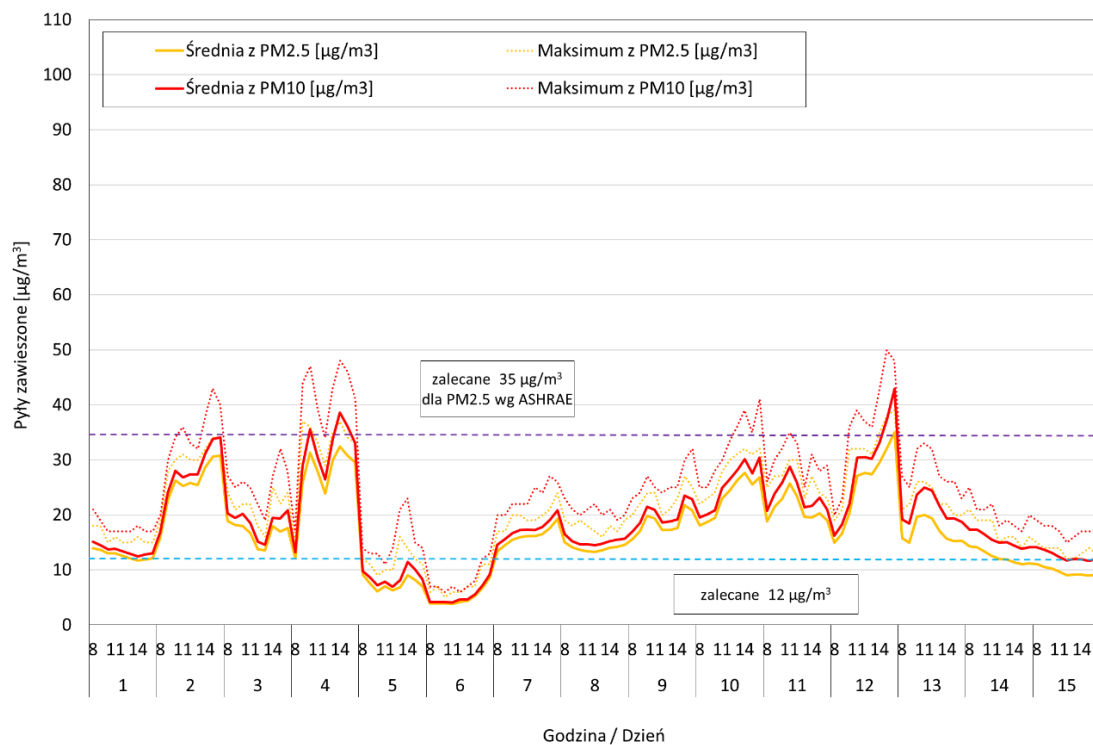
3.2.1. SALA A

Na rysunku 3.5 przedstawiono rozkład stężenia dwutlenku węgla.



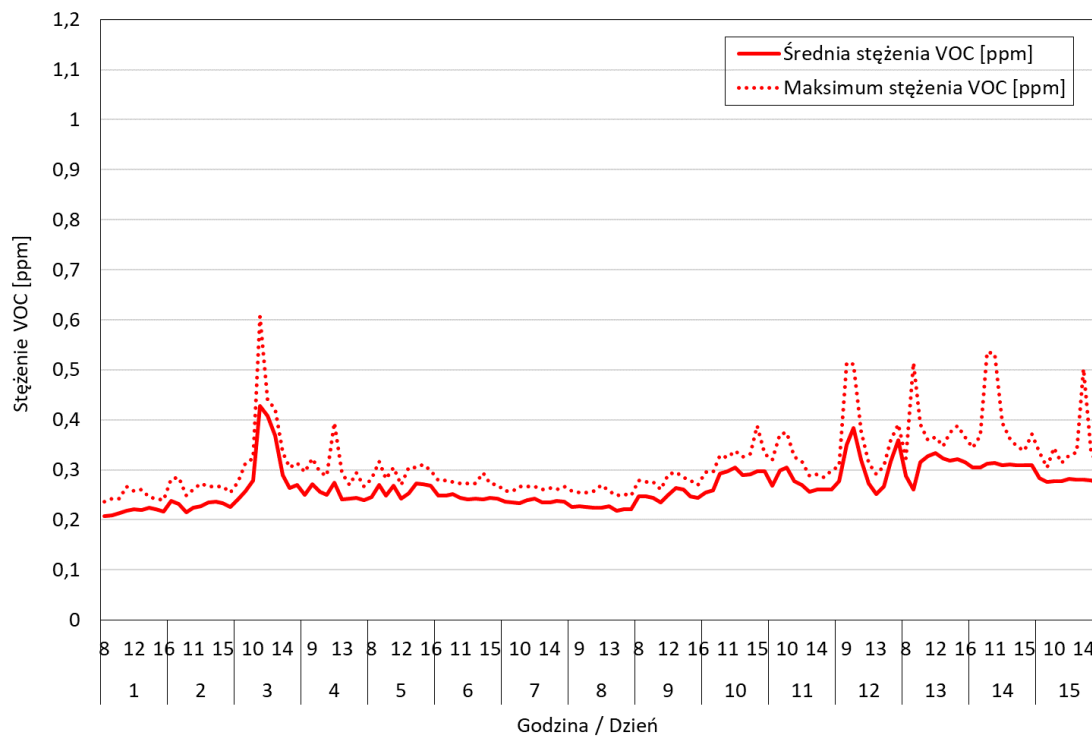
Rys. 3.5. Przebieg stężenia dwutlenku węgla w SALI A

Na rysunku 3.6 przedstawiono rozkład koncentracji cząstek PM2.5 i PM10.



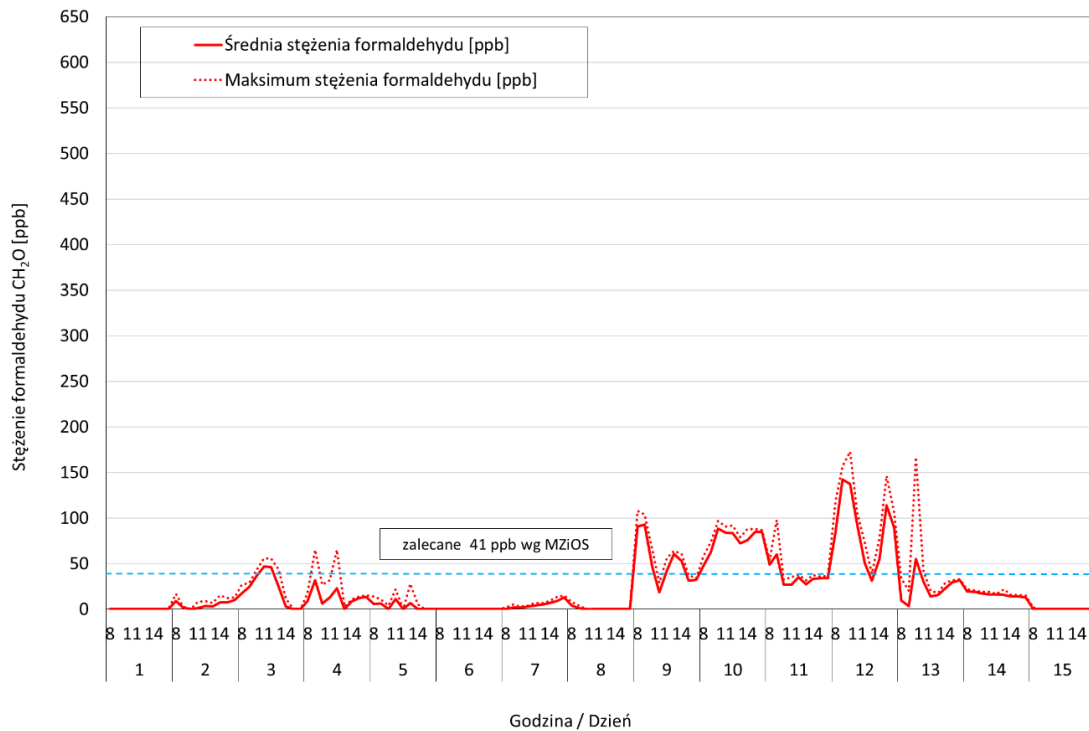
Rys. 3.6. Przebieg koncentracji cząstek PM2.5 i PM10 w SALI A

Na rysunku 3.7 przedstawiono zmianę stężenia VOC.



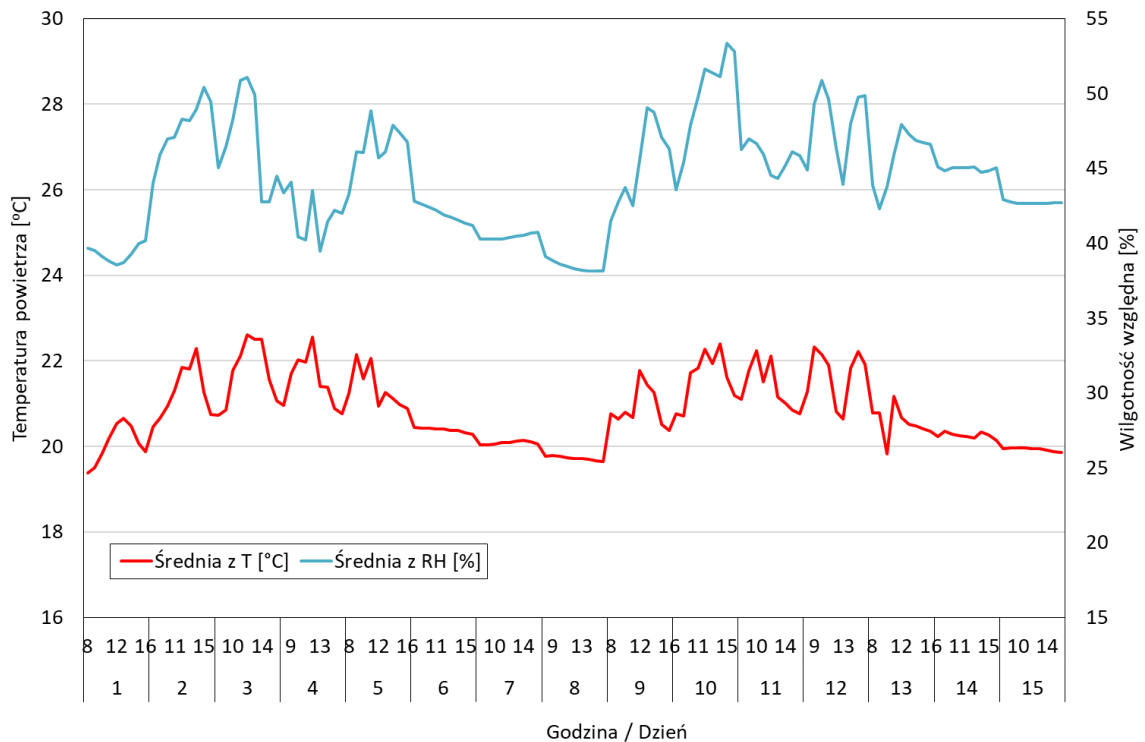
Rys. 3.7. Przebieg stężenia VOC w SALI A

Na rysunku 3.8 przedstawiono zmianę stężenia formaldehydu.



Rys. 3.8. Przebieg stężenia formaldehydu w SALI A

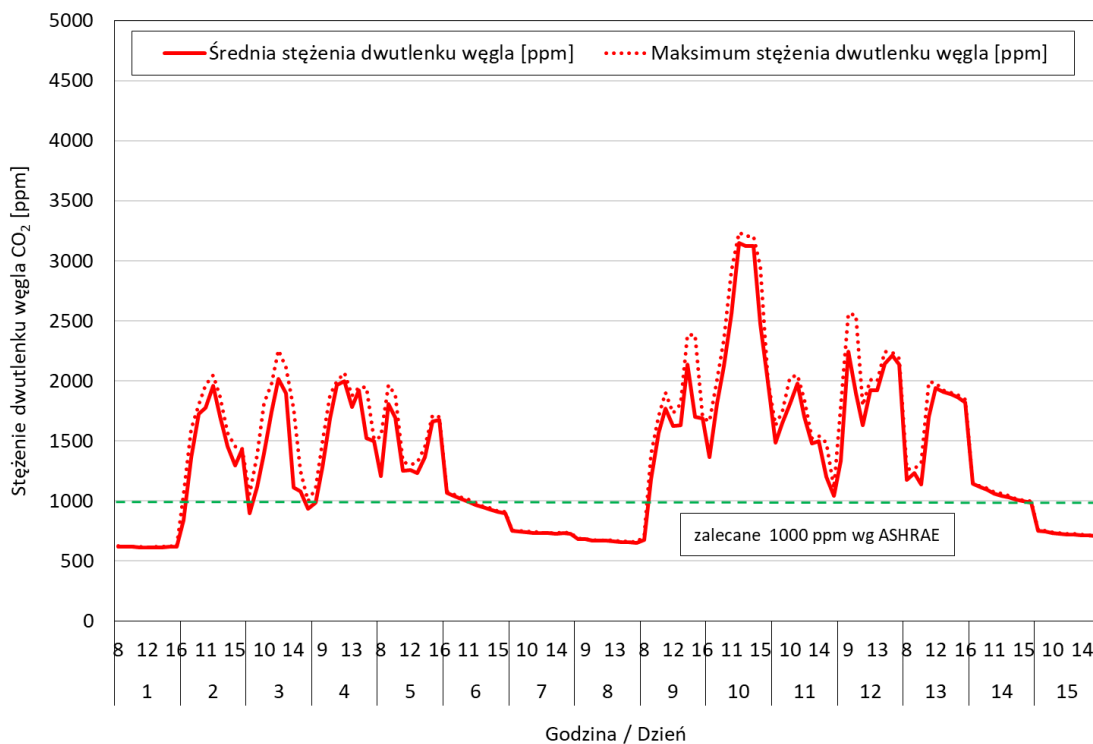
Na rysunku 3.9 przedstawiono zmianę temperatury oraz wilgotności powietrza.



Rys. 3.9. Przebieg temperatury i wilgotności powietrza w SALI A

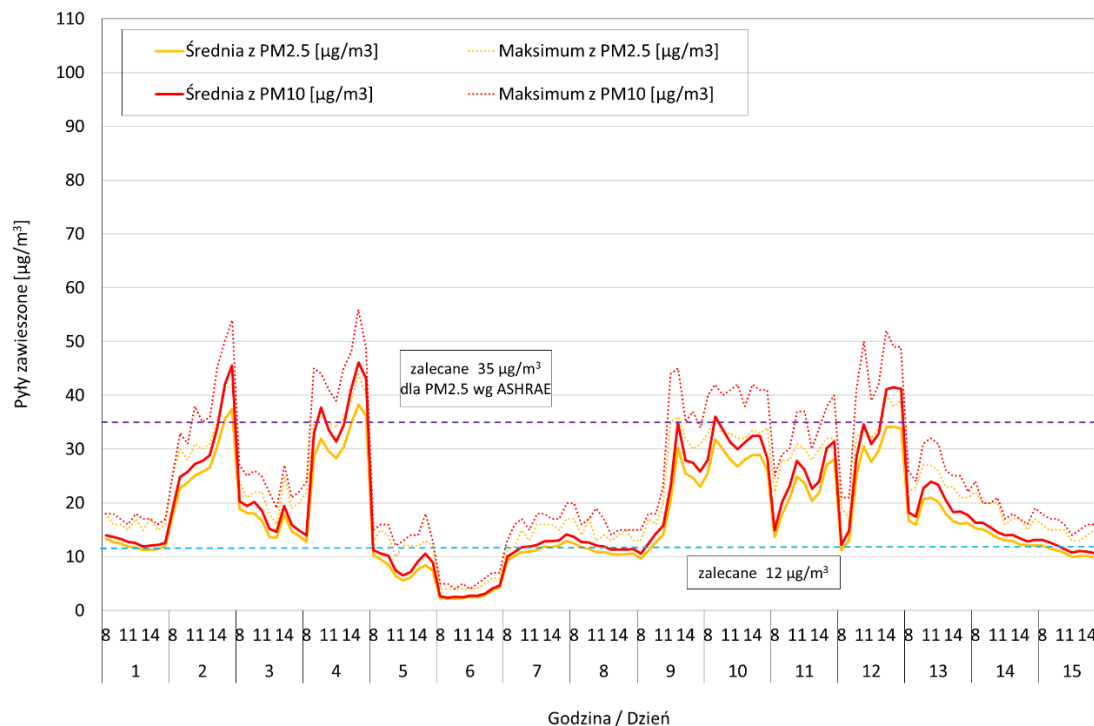
3.2.2. SALA B

Na rysunku 3.10 przedstawiono rozkład stężenia dwutlenku węgla.



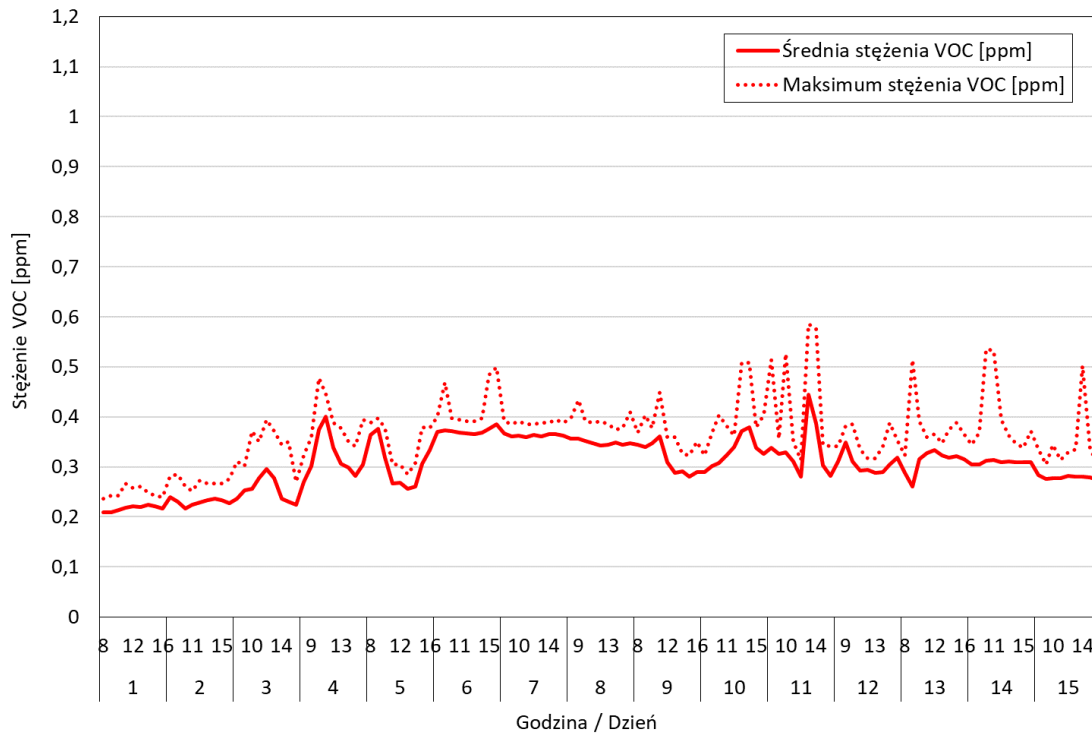
Rys. 3.10. Przebieg stężenia dwutlenku węgla w SALI B

Na rysunku 3.11 przedstawiono rozkład koncentracji cząstek PM2.5 i PM10.



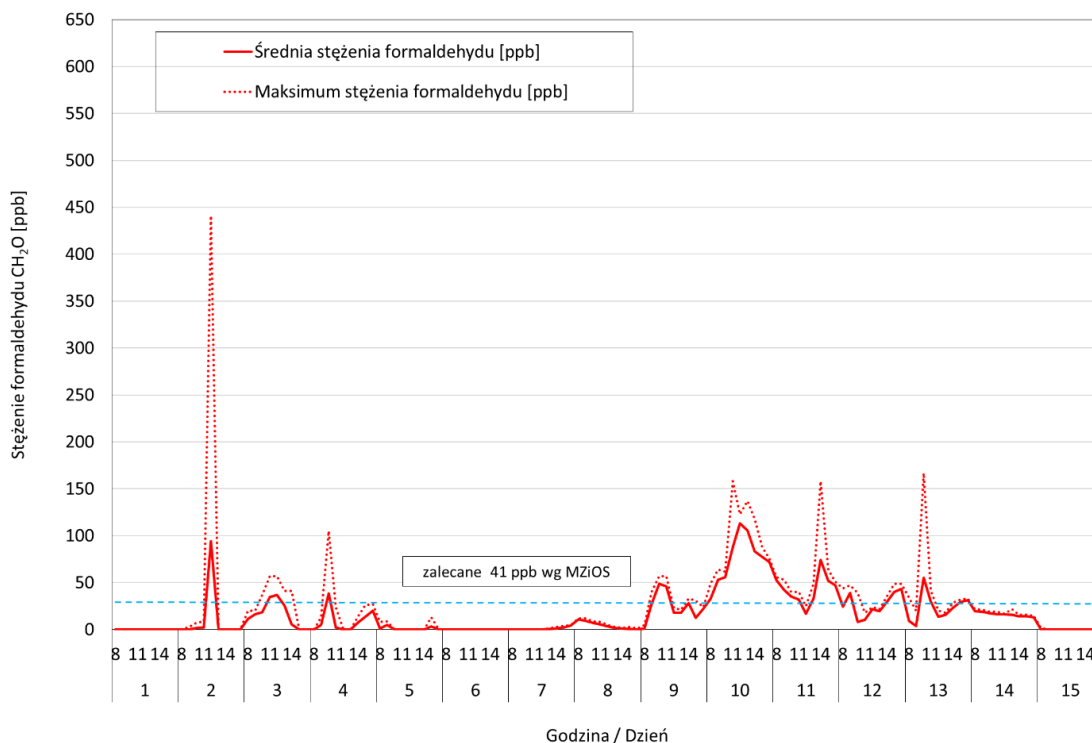
Rys. 3.11. Przebieg koncentracji cząstek PM2.5 i PM10 w SALI B

Na rysunku 3.12 przedstawiono zmianę stężenia VOC.



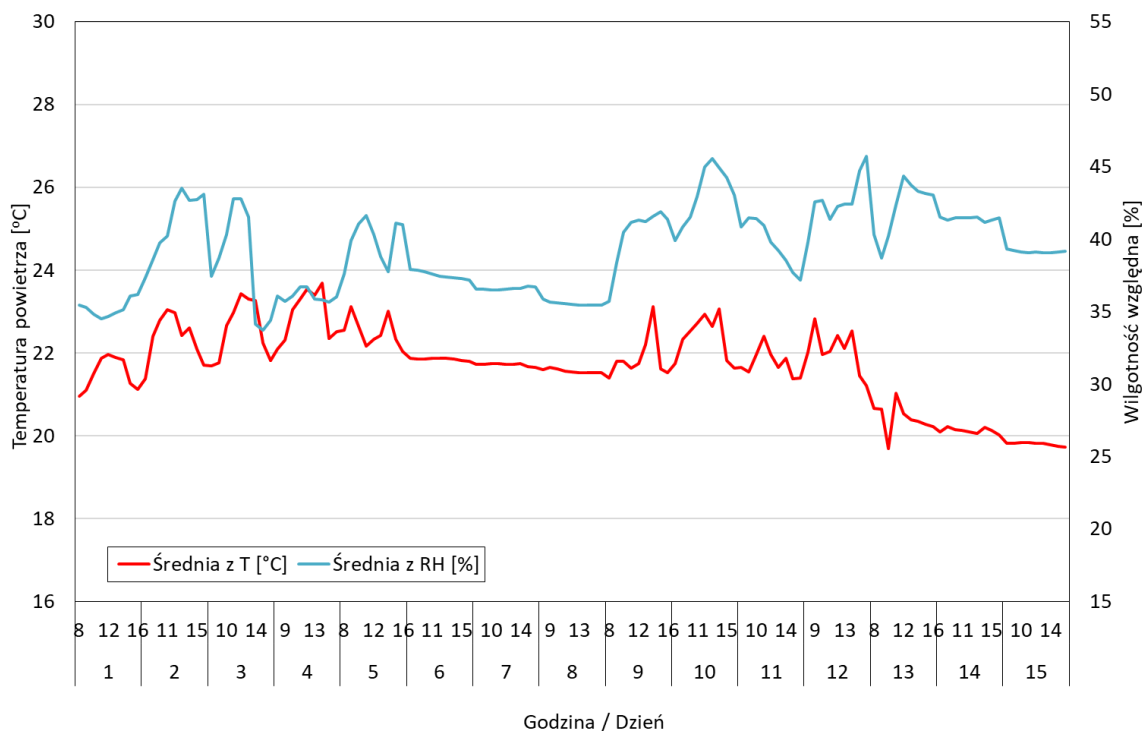
Rys. 3.12. Przebieg stężenia VOC w SALI B

Na rysunku 3.13 przedstawiono zmianę stężenia formaldehydu.



Rys. 3.13. Przebieg stężenia formaldehydu w SALI B

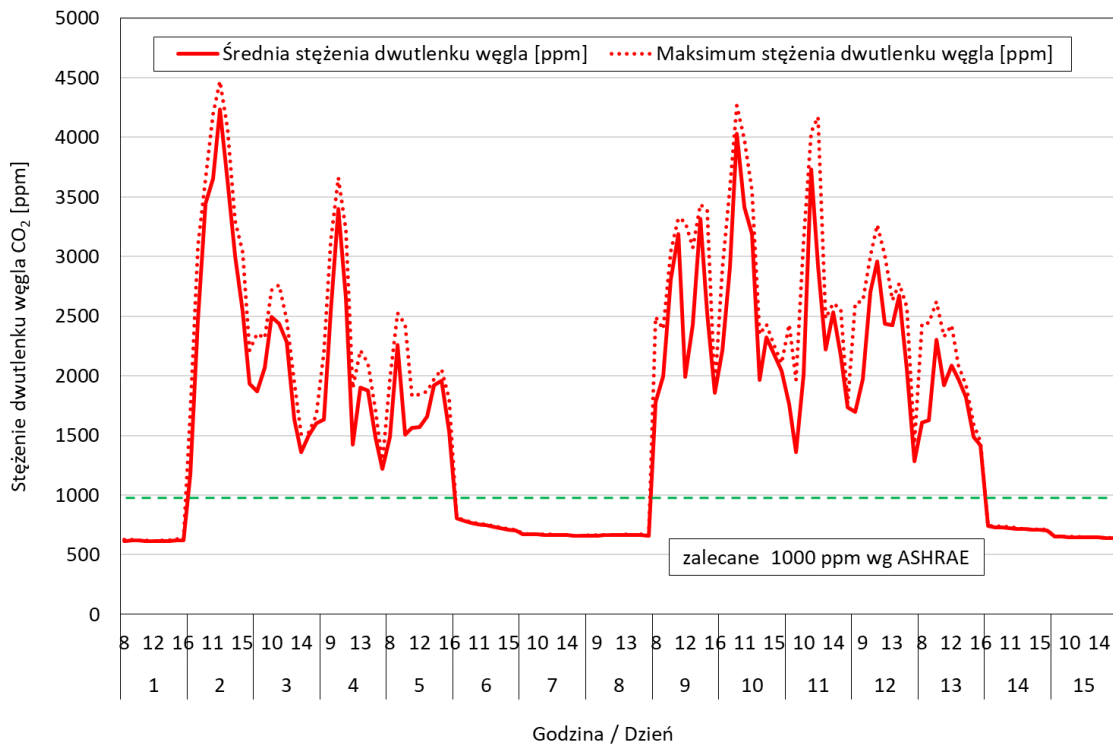
Na rysunku 3.14 przedstawiono zmianę temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego.



Rys. 3.14. Przebieg temperatury i wilgotności powietrza w SALI B

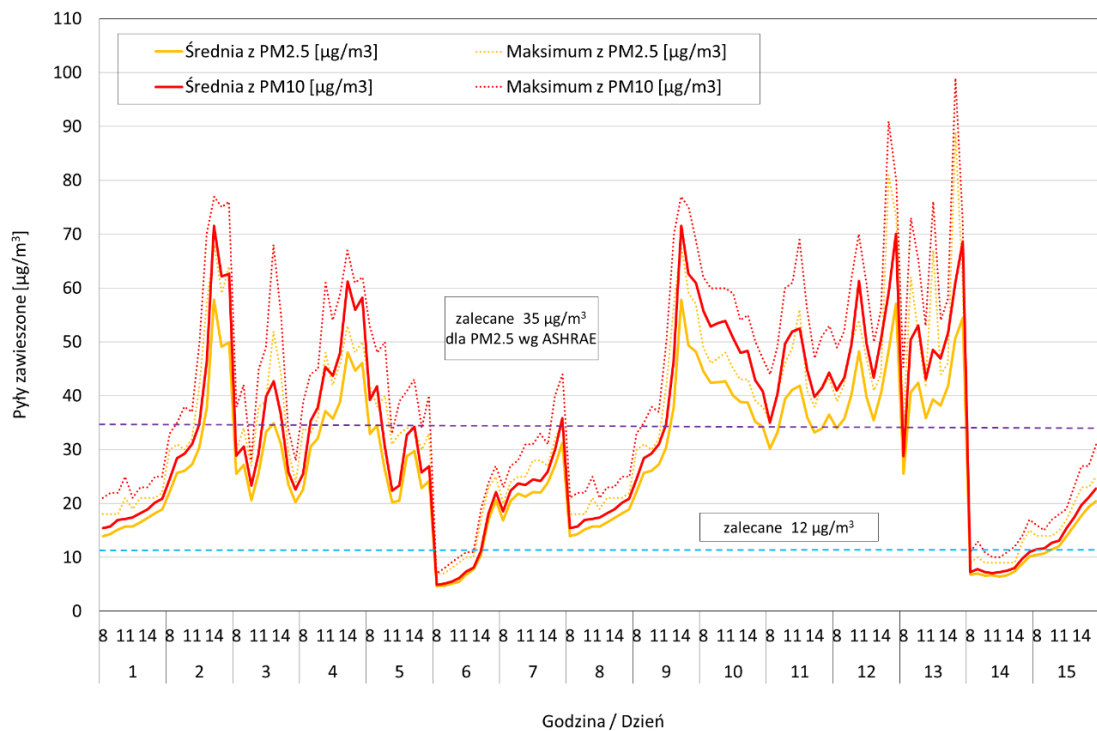
3.2.3. SALA C

Na rysunku 3.15 przedstawiono rozkład stężenia dwutlenku węgla.



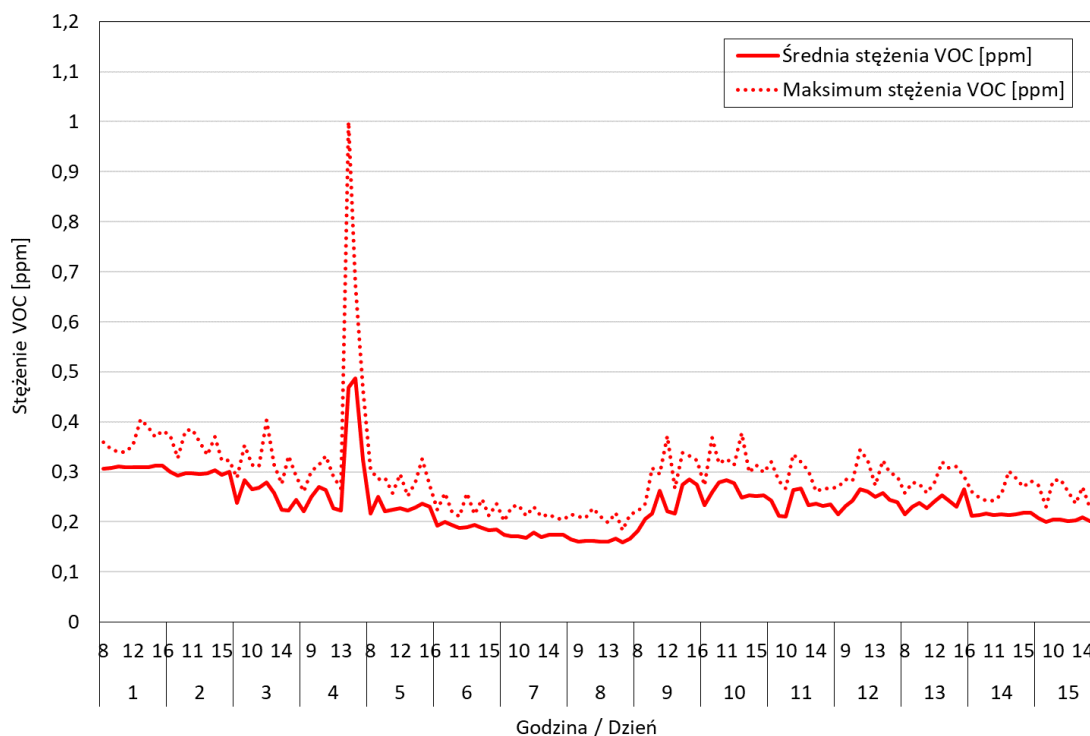
Rys. 3.15. Przebieg stężenia dwutlenku węgla w SALI C

Na rysunku 3.16 przedstawiono rozkład koncentracji cząstek PM2.5 i PM10.



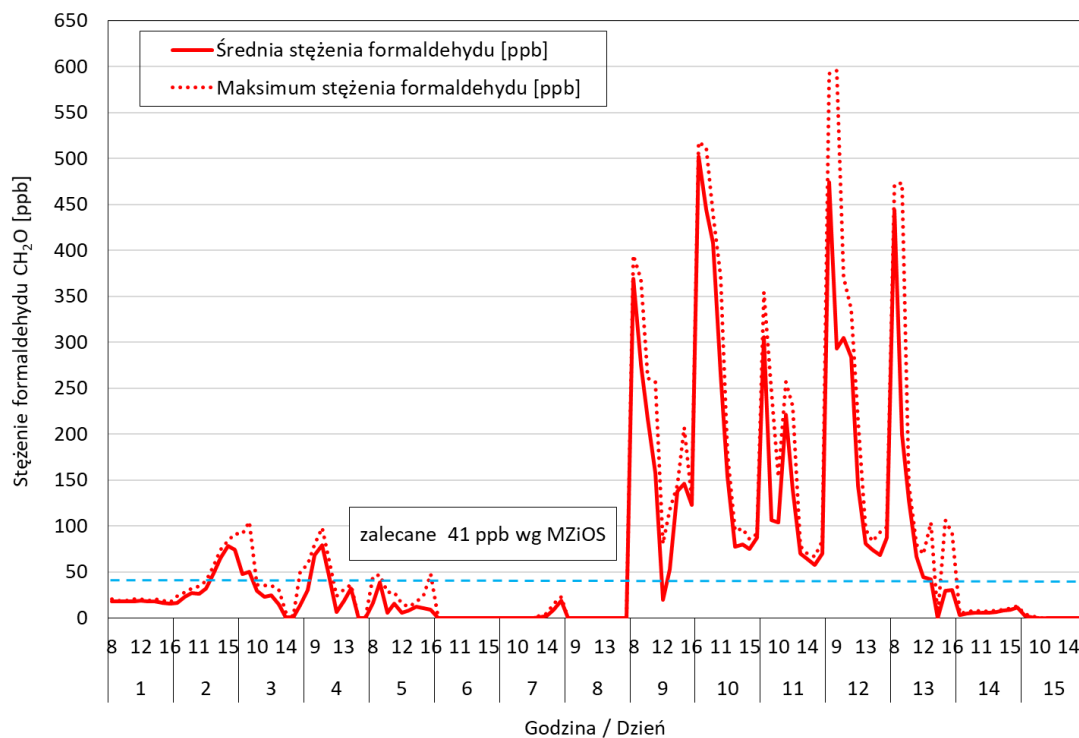
Rys. 3.16. Przebieg koncentracji cząstek PM2.5 i PM10 w SALI C

Na rysunku 3.17 przedstawiono zmianę stężenia VOC.



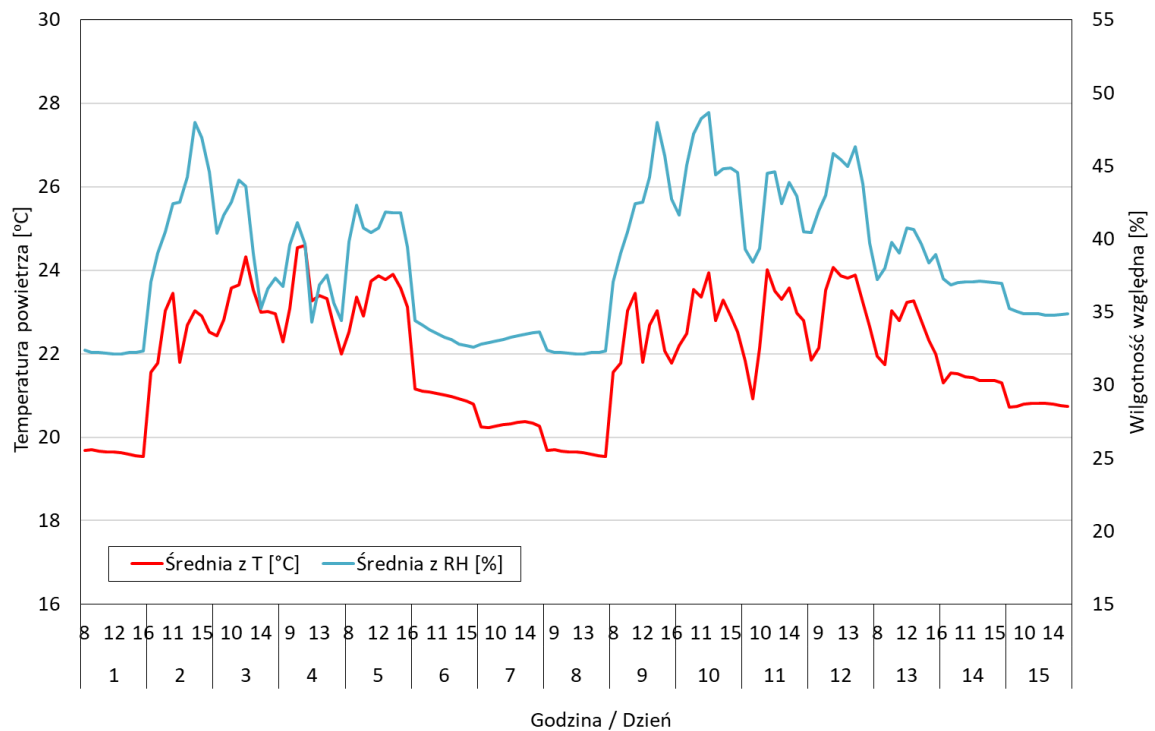
Rys. 3.17. Przebieg stężenia VOC w SALI C

Na rysunku 3.18 przedstawiono zmianę stężenia formaldehydu.



Rys. 3.18. Przebieg stężenia formaldehydu w SALI C

Na rysunku 3.19 przedstawiono zmianę temperatury oraz wilgotności powietrza wewnętrznego.



Rys. 3.19. Przebieg temperatury i wilgotności powietrza w SALI C

3.3. Dyskusja wyników

Przez cały czas pobytu w szkole dzieci narażone są na szereg czynników wpływających na ich zdrowie i samopoczucie. Szczególnie widoczne jest to w przypadku CO₂. Z badań wynika, że przez większą część dnia (91,9-98,6%) dzieci przebywają w środowisku, w którym odnotowano stężenie tego związku powyżej 1000 ppm (tabela 3.3).

Tabela 3.3. Ocena narażenia na stężenie CO₂

Zmierzone stężenie CO ₂	Liczba godzin [h]	Czas spędzony w danym stężeniu [%]
Sala A V=188m³		
>1000 ppm	66,18	91,9
>1500 ppm	52,67	73,2
>2000 ppm	25,22	35,0
Sala B V=236,6m³		
>1000 ppm	67,49	93,7
>1500 ppm	46,82	65,0
>2000 ppm	11,33	15,7
Sala C V=132m³		
>1000 ppm	71,02	98,6
>1500 ppm	61,42	85,3
>2000 ppm	43,71	60,7

Najniższe stężenia CO₂ odnotowano dla sali o największej kubaturze. Podobna sytuacja dotyczyła stężenia formaldehydu. Czynności remontowe przeprowadzane w sąsiedniej sali widowiskowej wpłynęły na uzyskane wartości tego zanieczyszczenia przede wszystkim w Sali C oraz w przestrzeni korytarza.

Tabela 3.4. Ocena narażenia związanego z koncentracją cząstek PM_{2.5}

Zmierzona koncentracja cząstek PM	Liczba godzin [h]	Czas spędzony w danej koncentracji [%]
Sala A V=188m³		
PM 2.5 ≥35 µg/m ³	0,51	0,7
Sala B V=236,6m³		
PM 2.5 ≥35 µg/m ³	1,8	2,5
Sala C V=132m³		
PM 2.5 ≥35 µg/m ³	35,69	49,6

W przypadku PM_{2.5} w SALI C, w której uczniowie nie opuszczają pomieszczenia podczas przerw, odnotowano najniekorzystniejsze stężenia >35 µg/m³ (tabela 3.4). Sala o dużej kubaturze oraz klasa, w której uczniowie często wychodzą na przerwę na korytarz, a nauczyciele

regularnie wietrzyli pomieszczenia uzyskała satysfakcjonujące wyniki. Należy pamiętać, że badacze zalecają utrzymanie koncentracji PM_{2.5} na poziomie poniżej 12 µg/m³. Biorąc pod uwagę ich wytyczne, wyniki związane z oceną narażenia na zanieczyszczenia pyłowe uległyby drastycznemu pogorszeniu.

Pomimo częstego wietrzenia w każdej badanej sali odnotowano średnie temperatury powyżej 20 stopni (przeważnie powyżej 21, 22°C, tabela 3.6). W SALI A temperatura sięgnęła 25°C.

Tabela 3.6. Ocena narażenia związanego z przegrzaniem sal lekcyjnych

Zmierzone parametry powietrza	Liczba godzin [h]	Czas spędzony w podwyższonej temperaturze [%]
	Sala A V=188m³	
Temperatura ≥21°C	48,82	67,8
	Sala B V=236,6m³	
Temperatura ≥21°C	64,49	89,6
	Sala C V=132m³	
Temperatura ≥21°C	68,51	95,0

Badania pokazały, że podczas przerw, na korytarzu, uczniowie przebywają często w gorszych warunkach niż odnotowane w klasie.

Szczegółowe wyniki z korytarzy szkolnych zestawiono w pełnym raporcie pt. *Raport z badania jakości powietrza wewnętrznego w salach lekcyjnych*.

Należy podkreślić, że w trakcie pomiarów nauczyciele wietrzyli salę nie tylko podczas przerw, ale również pozostawiali czasowo uchylone okna w trakcie lekcji. Sytuacja ta dotyczyła ponad 95% zestawionych wyników. Informacja o długości wietrzenia pomogłaby dodatkowo zinterpretować różnice w uzyskanych stężeniach CO₂. Dlatego zaleca się powtórzenie badań z dokładnym monitorowaniem zachowań związanych z czasem trwania otwierania/uchylania okien.

4. PRZEDSZKOLE

4.1. Opis obiektu

Badania przeprowadzono w termomodernizowanym przedszkolu. Budynek docieplono oraz wymieniono w nim stolarkę okienną. Przedszkole oddano do użytkowania w 1991 r. Zlokalizowane jest w centrum miejscowości liczącej ponad 300 tys. mieszkańców.



Rys. 4.1 Widok budynku przedszkola po termomodernizacji

Tabela 4.1. Dane o obiekcie

Powierzchnia użytkowa [m ²]	Kubatura [m ³]	Liczba kondygnacji	
		nadziemnych	podziemnych
623,5	1870,5	1	0

Wentylacja obiektu: Pomieszczenia biurowe oraz sale wentylowane są grawitacyjnie.

Instalacja centralnego ogrzewania: Budynek posiada własny węzeł wymiennikowy, który jest zasilany z sieci miejskiej.

Ściany zewnętrzne: brak informacji i projektu architektonicznego obiektu.

Stropodach: brak informacji i projektu architektonicznego obiektu.

Okna: plastikowe w całym obiekcie.

Tabela 4.2. Dane ogólne do sali objętej badaniem

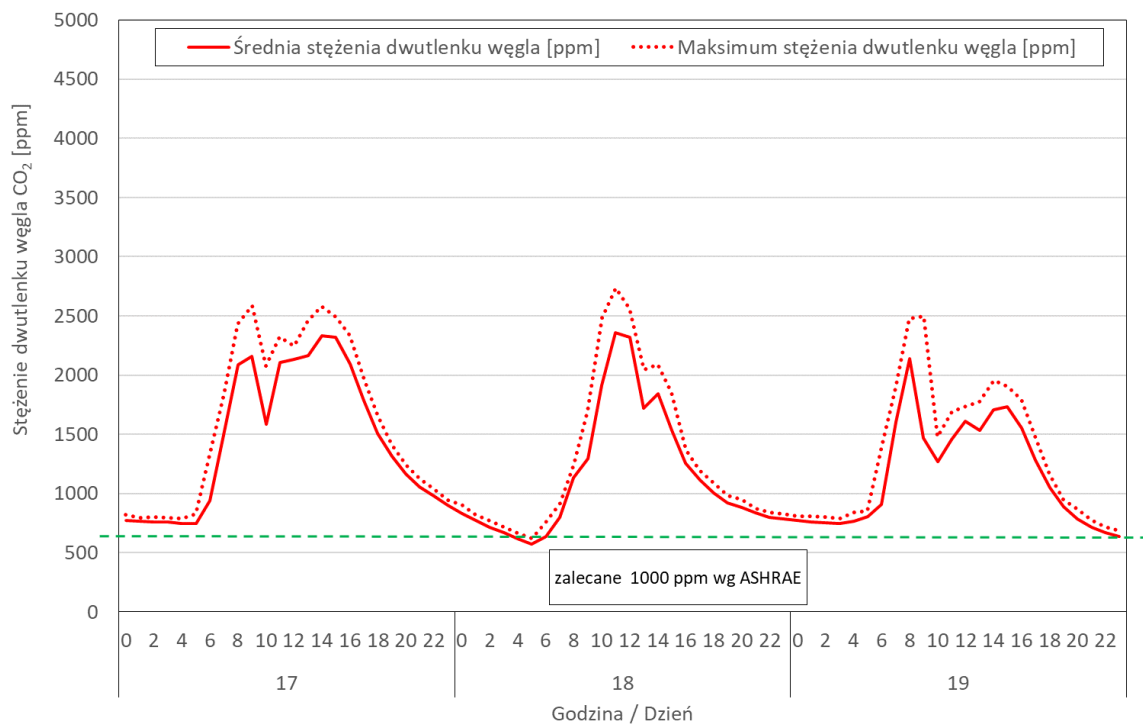
Klasa	Sala grupy przedszkolnej
Kondygnacja	parter
Strona świata	NE
Powierzchnia, m ²	32,5
Kubatura, m ³	97,5
Liczba i wymiar okien	2 okna zewnętrzne o wymiarach 1,5x1,5m z roletami wewnętrznymi w jasnym kolorze (dzień/noc);
Drzwi wewnętrzne	0,9x2m na korytarz 0,8x2m do części sanitarnej
Wyposażenie	4 stoliki, 24 krzesła, 10 regalików, 3 tablice wystawowe, półka wisząca, tv
Oświetlenie	6 opraw oświetleniowych o dł. 120cm przymocowanych do sufitu
Podłoga i wykończenie ścian	Na podłodze panele, w części pomieszczenia dywan, ściany do połowy pomalowane farbą akrylową
Grzejniki	2 grzejniki stalowe płytowe pod oknami zewn.



Rys.4.2. Sala grupy przedszkolnej

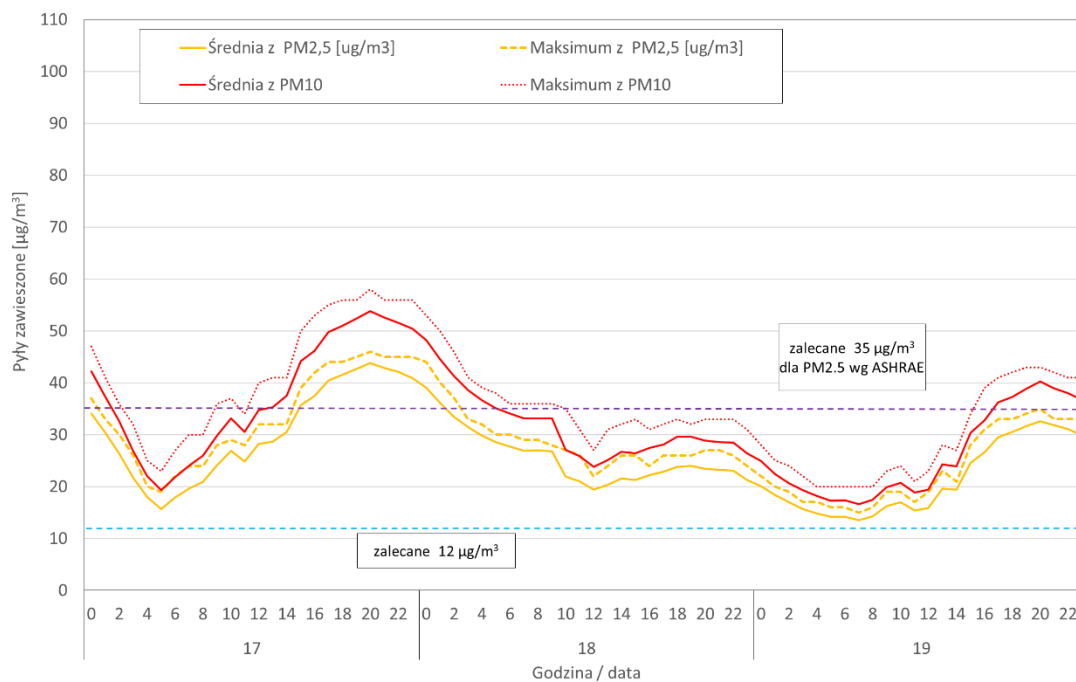
4.2. Wyniki

Wszystkie pomiary wykonano dla pełnej doby. Na rysunku 4.3 przedstawiono rozkład stężenia dwutlenku węgla.



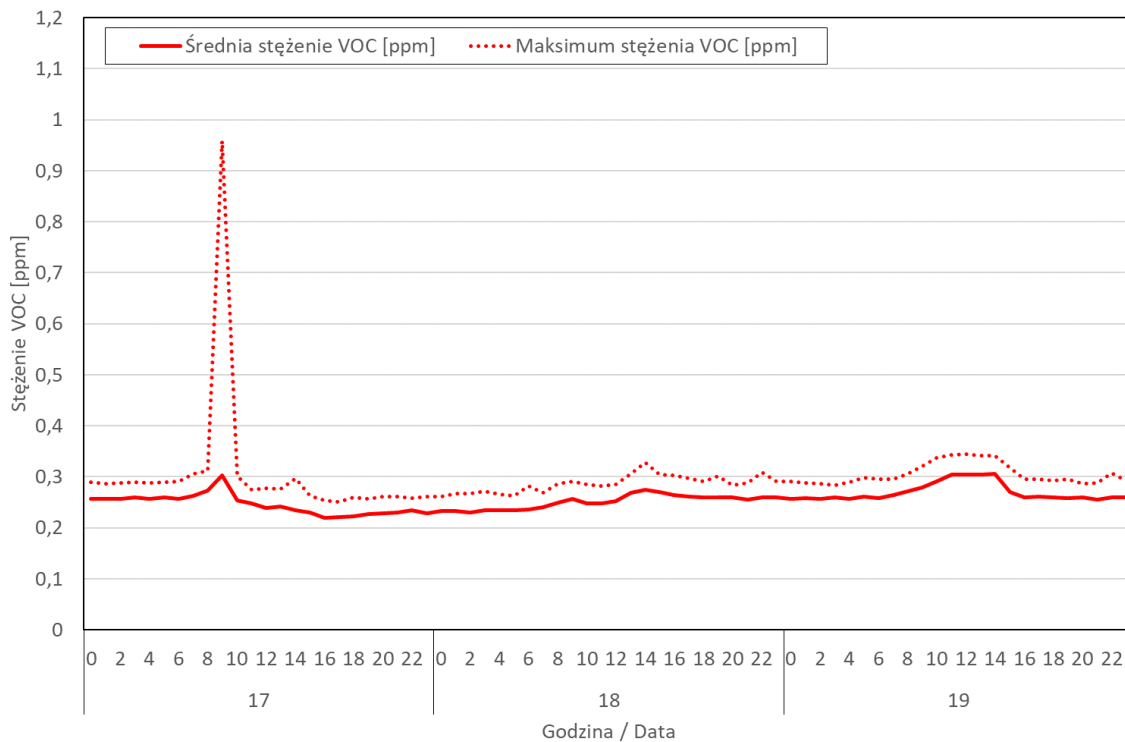
Rys. 4.3. Przebieg stężenia dwutlenku węgla w sali przedszkolnej

Na rysunku 4.4 przedstawiono rozkład koncentracji cząstek PM2.5 i PM10.



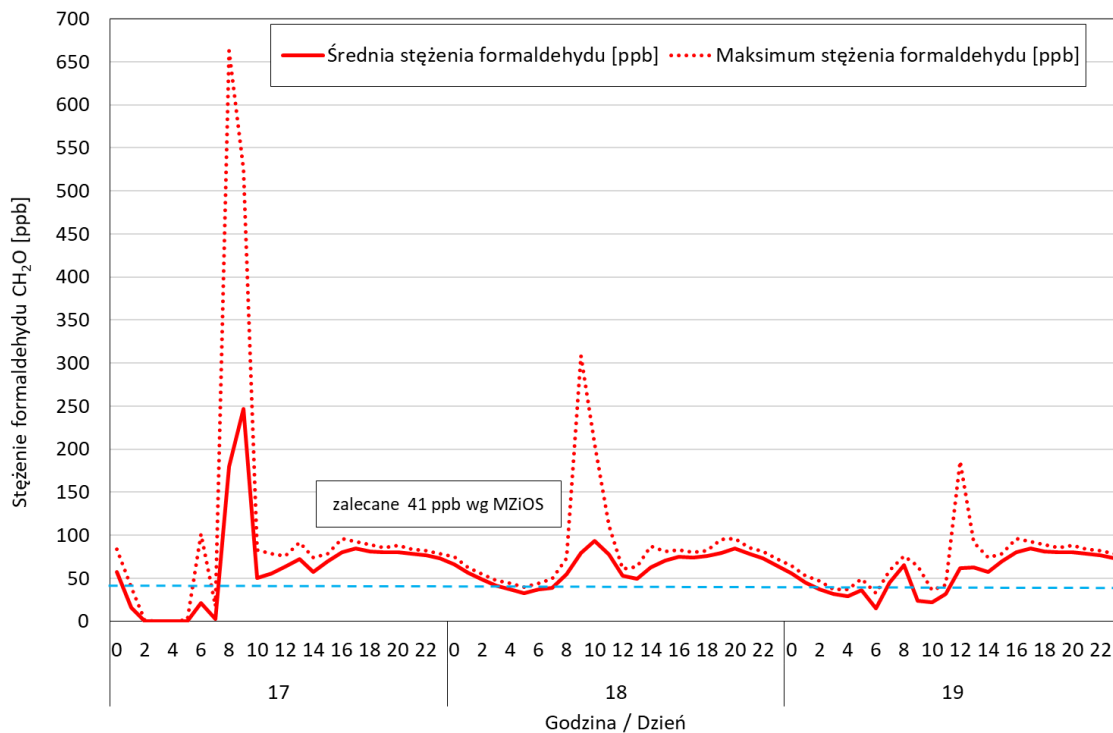
Rys. 4.4. Przebieg koncentracji cząstek PM2.5 i PM10 w sali przedszkolnej

Na rysunku 4.5 przedstawiono zmianę stężenia VOC.



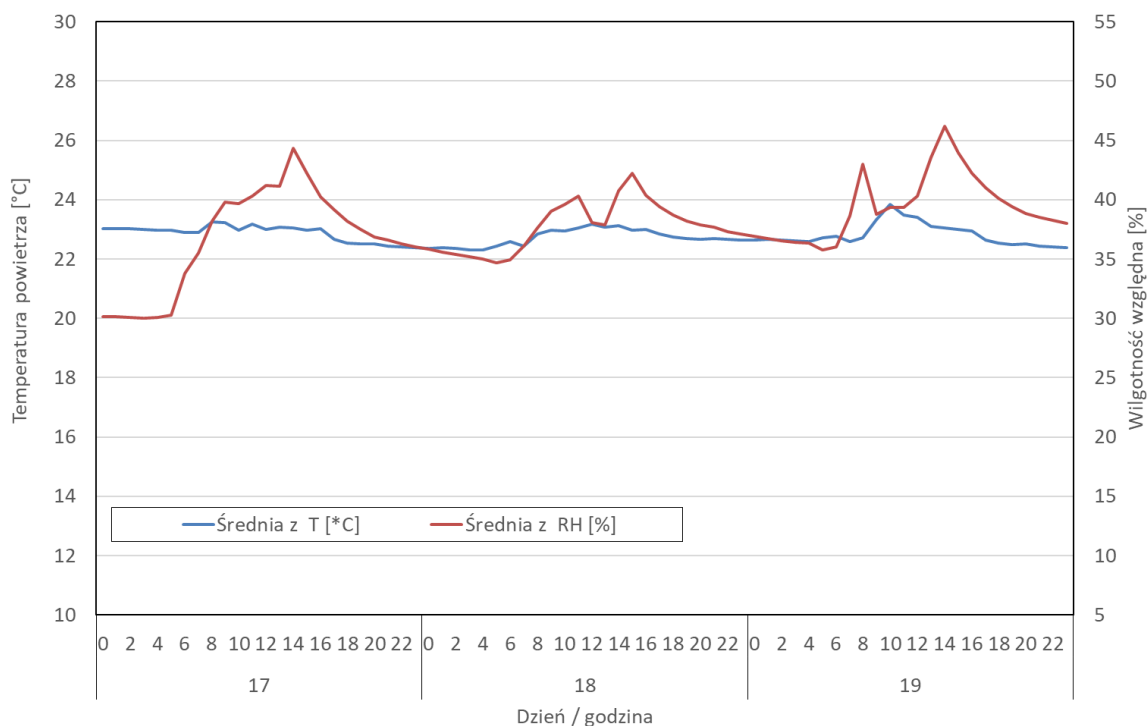
Rys. 4.5. Przebieg stężenia VOC w sali przedszkolnej

Na rysunku 4.6 przedstawiono zmianę stężenia formaldehydu.



Rys. 4.6. Przebieg stężenia formaldehydu w sali przedszkolnej

Na rysunku 4.7 przedstawiono zmianę temperatury oraz wilgotności powietrza wewnętrznego.



Rys. 4.7. Przebieg temperatury i wilgotności względnej powietrza w sali przedszkolnej

4.3. Dyskusja wyników

Z badań wynika, że przez większą część dnia (96,9%) dzieci przebywają w środowisku, w którym odnotowano stężenie dwutlenku węgla powyżej 1000 ppm (tabela 4.3).

Tabela 4.3. Ocena narażenia na stężenie CO₂, temperaturę oraz pył PM2.5

Zmierzone stężenie CO ₂	Liczba godzin [h]	Czas spędzony w danym stężeniu zanieczyszczenia lub temp. [%]
Sala przedszkolna V= 92,1 m³		
>1000 ppm	29,07	96,9
>1500 ppm	20,83	69,4
>2000 ppm	10,48	34,93
Temperatura ≥21°C	29,7	99
PM 2.5 ≥35 µg/m ³	1,63	5,43

We wszystkich dniach pomiarowych odnotowano wysokie stężenie CO₂ oraz znaczący wzrost temperatury, pomimo iż według dziennika uzupełnianego przez nauczycieli sala była często

wietrzona. Regularnie otwierano okna oraz drzwi. Wyraźnie widać, iż doraźne sposoby poprawy jakości powietrza nie są wystarczające do utrzymania optymalnych warunków wewnętrznych.

W przypadku PM2.5 wykazano narażenie na poziom koncentracji powyżej 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ przez ok.5.5% czasu. Należy jednak pamiętać, że badacze zalecają utrzymanie koncentracji PM2.5 na poziomie poniżej 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Biorąc pod uwagę ich wytyczne, wyniki związane z oceną narażenia na zanieczyszczenia pyłowe uległyby drastycznemu pogorszeniu.

5. SZKOŁA WYŻSZA

5.1. Opis obiektu

Badania przeprowadzono na jednej z uczelni wyższych w miejscowości liczącej ponad 300 tys. mieszkańców. Budynek użytkowany częściowo od 2001 roku.

Tabela 5.1. Dane o obiekcie

Powierzchnia użytkowa [m ²]	Kubatura [m ³]	Liczba kondygnacji
		nadziemnych
3495,8	19106	5
Powierzchnia ogrzewana [m ²]	kubatura ogrzewana [m ³]	podziemnych
2904,0	15885	2

Wentylacja obiektu: Większość pomieszczeń biurowych i sal dydaktycznych posiada wentylację grawitacyjną – kanały murowane z cegły ceramicznej pełnej.

Instalacja centralnego ogrzewania: węzeł wymiennikowy dwufunkcyjny zasilany z sieci miejskiej; zapotrzebowanie na ciepło na cele c.o. 220 kW; parametry wody sieciowej 135/60°C.

Ściany zewnętrzne: ściany zewnętrzne części nadziemnej wykonane z belitu o grubości 24 cm, ocieplone 8 cm styropianu i wykończone cegłą licówką 12 cm, $U=0,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Stropy: gęstożebrowe Ackermana oraz żelbetowe wylewane, ocieplone wełną mineralną o grubości 20 cm.

Okna: stolarka okienna aluminiowa szklona szkłem refleksyjnym.



Rys. 5.1. Widok budynku uczelni wyższej

Tabela 5.2. Dane ogólne do sali objętej badaniem

Klasa	Sala dydaktyczna
Kondygnacja	2 piętro
Strona świata	NE
Powierzchnia, m ²	27,9
Kubatura, m ³	92,1
Liczba i wymiar okien	2 okna zewnętrzne aluminiowe 1,7x1,8m z roletami w kolorze ciemnym niebieskim
Drzwi wewnętrzne	drzwi wewnętrzne na korytarz 0,9x2m
Wyposażenie	9 podwójnych ławek, 22 krzesła, biurko prowadzącego, 3 biurka z nadstawkami na końcu sali, 2 tablice, komputer, projektor, ekran
Oświetlenie	6 opraw oświetleniowych przymocowanych do sufitu ok.120cm
Podłoga i wykończenie ścian	Podłoga wykończona terakotą, ściany farbą akrylową
Grzejniki	2 grzejniki płytowe pod oknami zewn.

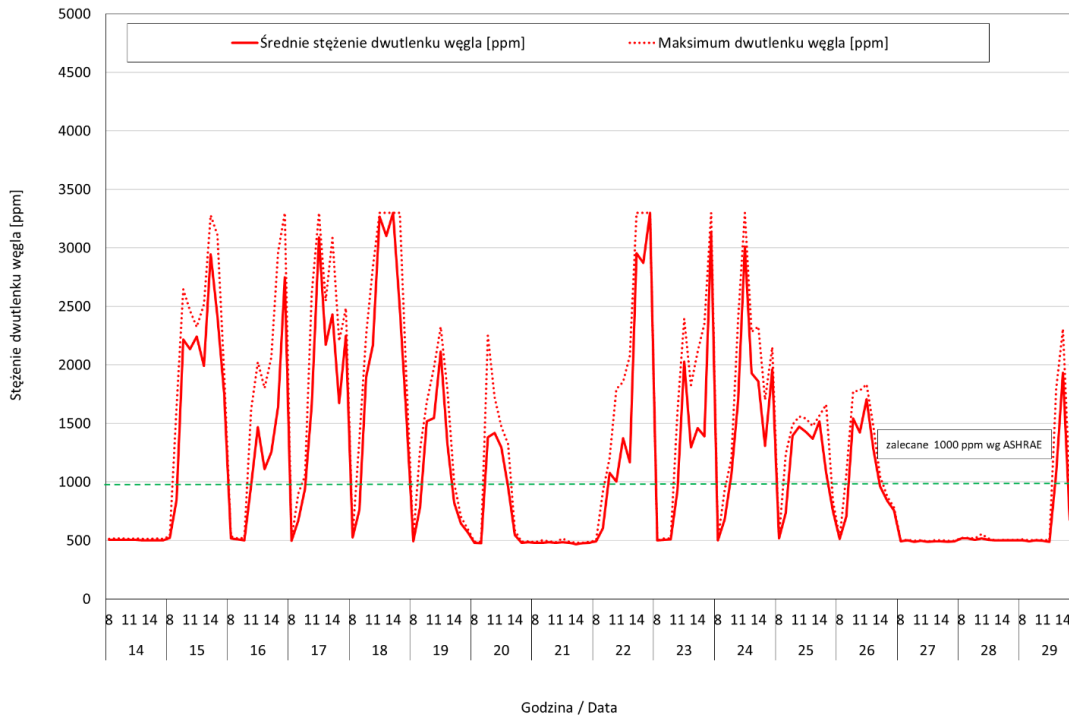


Rys. 5.2. Widok sali dydaktycznej



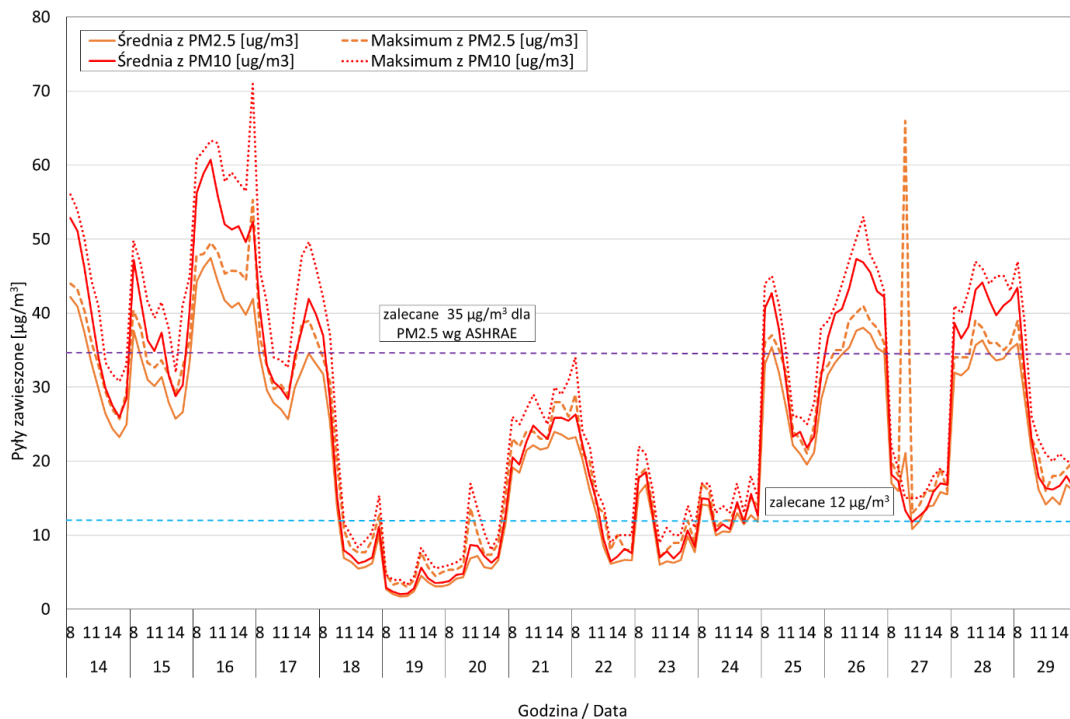
5.2. Wyniki

Wszystkie pomiary wykonano dla godzin 8:00-16:00, czyli podczas obecności studentów. Na rysunku 5.3 przedstawiono rozkład stężenia dwutlenku węgla.



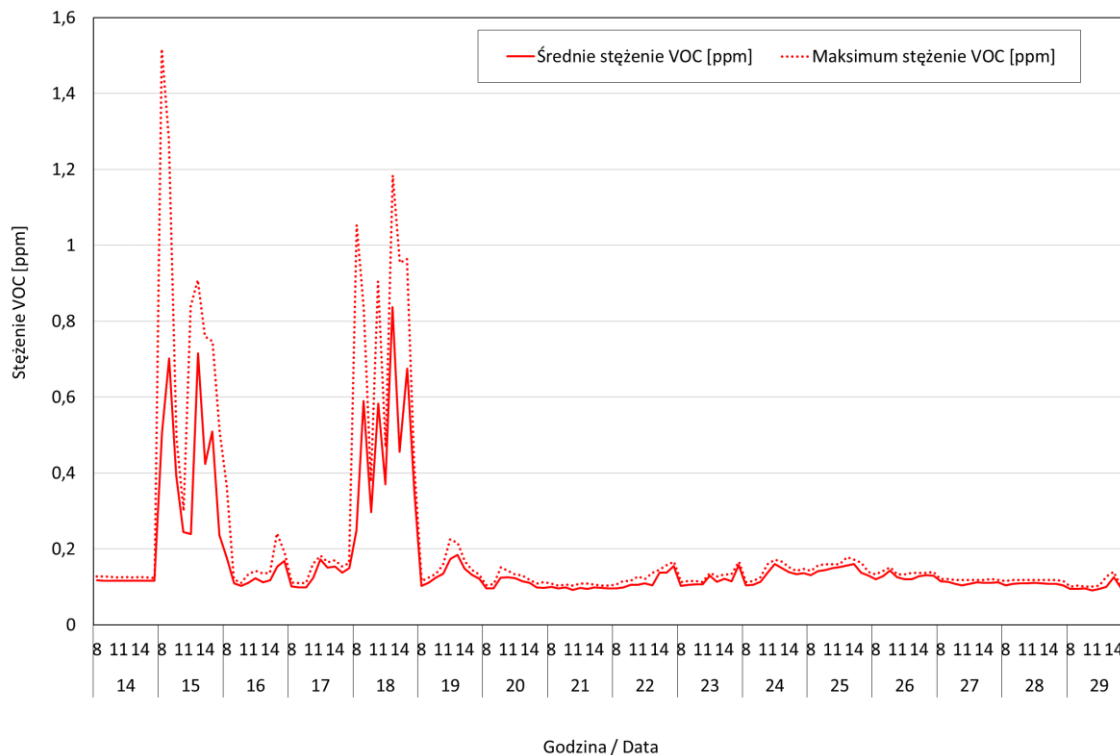
Rys. 5.3. Przebieg stężenia dwutlenku węgla w sali dydaktycznej

Na rysunku 5.4 przedstawiono rozkład koncentracji cząstek PM2.5 i PM10.



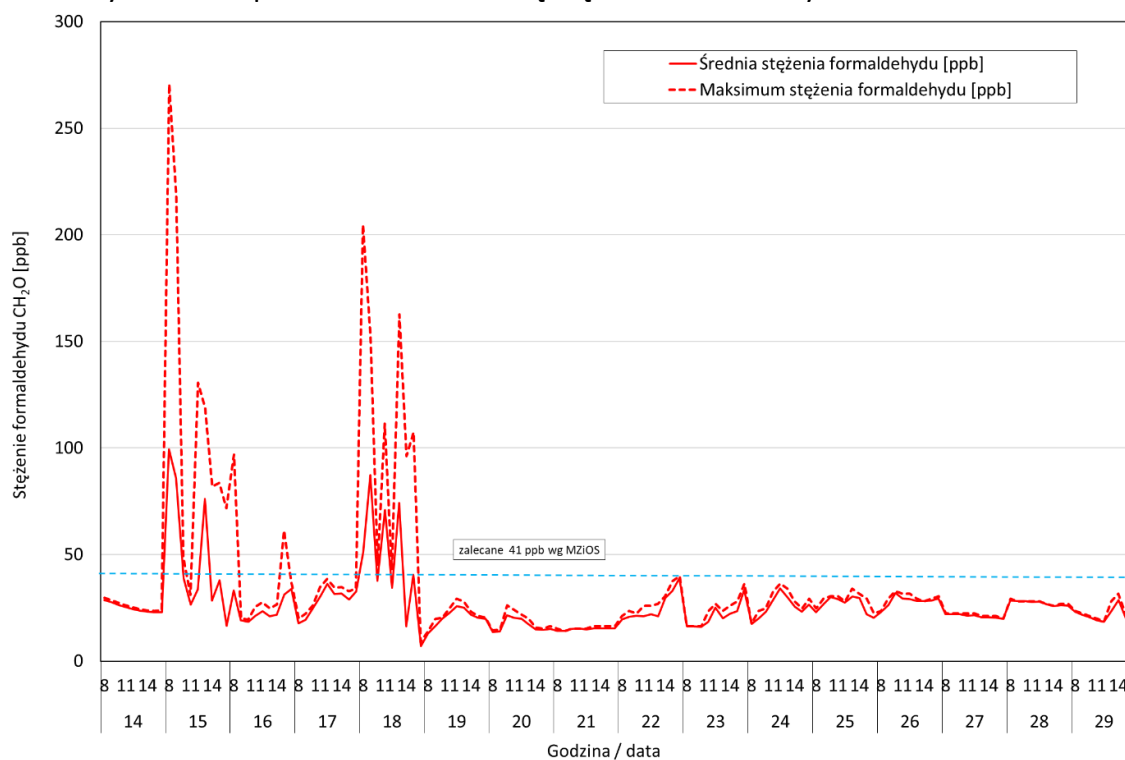
Rys. 5.4. Przebieg koncentracji cząstek PM2.5 i PM10 w sali dydaktycznej

Na rysunku 5.5 przedstawiono zmianę stężenia VOC.



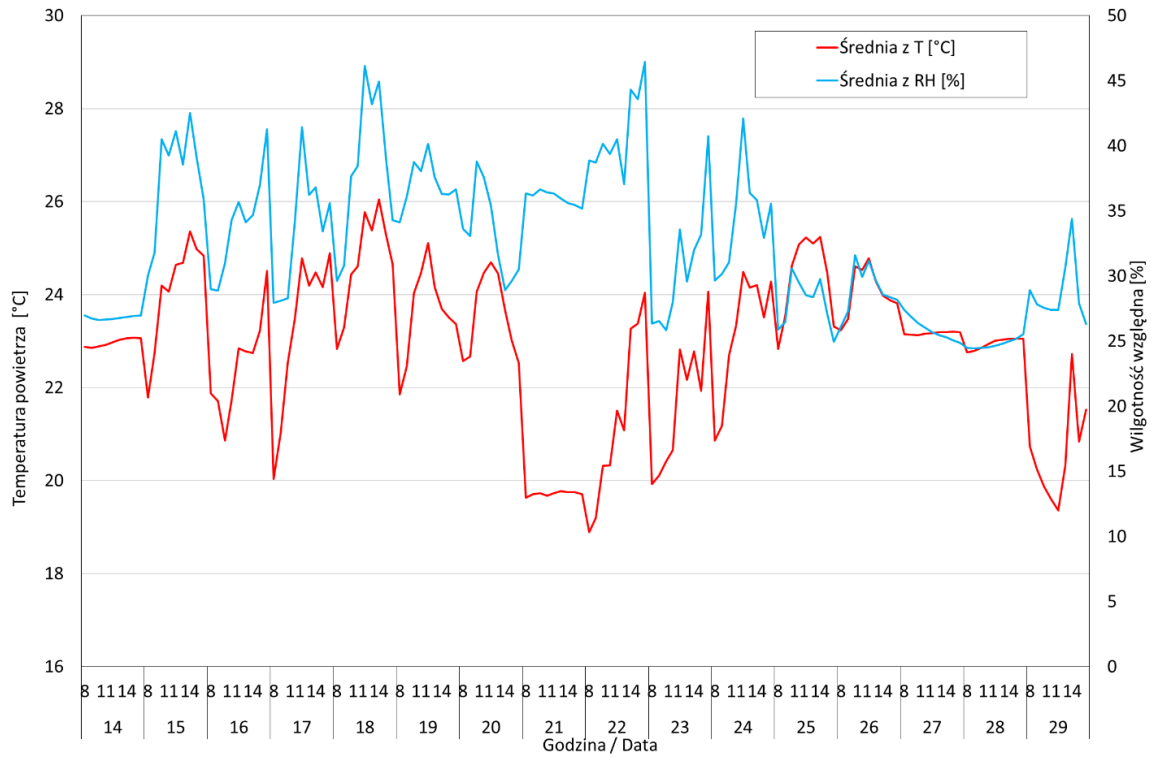
Rys. 5.5. Przebieg stężenia VOC w sali dydaktycznej

Na rysunku 5.6 przedstawiono zmianę stężenia formaldehydu.



Rys. 5.6. Przebieg stężenia formaldehydu w sali dydaktycznej

Na rysunku 5.7 przedstawiono zmianę temperatury oraz wilgotności powietrza wewnętrznego.



Rys. 5.7. Przebieg temperatury i wilgotności względnej powietrza w sali dydaktycznej

5.3. Dyskusja wyników

Z badań wynika, że przez prawie połowę dnia (47,2%) studenci przebywają w środowisku, w którym odnotowano stężenie dwutlenku węgla powyżej 1000 ppm.

Tabela 4.3. Ocena narażenia na stężenie CO₂, temperaturę oraz pył PM_{2.5}

Zmierzone stężenie CO ₂	Liczba godzin [h]	Czas spędzony w danym stężeniu zanieczyszczenia lub temp.[%]
sala dydaktyczna V= 92,1 m³		
>1000 ppm	32,10	47,2
>1500 ppm	25,65	37,72
>2000 ppm	16,58	26,32
Temperatura ≥21°C	46,63	68,6
PM 2.5 ≥35 µg/m ³	12,37	18,19

Uzyskane niższe wyniki niż w szkole podstawowej, czy przedszkolu wynikają z małej liczby użytkowników, wietrzenia sali w trakcie i pomiędzy zajęciami. Pomimo doraźnych czynności polegających na otwieraniu okien nie udało się obniżyć temperatury w pomieszczeniu, a przez prawie połowę monitorowanego czasu odnotowywano stężenie CO₂ > 1000 ppm.

6. PODSUMOWANIE

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. Większość 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 co powoduje, że w okresach bezwietrznych, wartość ciśnienia czynnego powodującego przepływ powietrza jest niewielka i uniemożliwia napływ powietrza do pomieszczenia. 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.

Przepisy, normy, czy wytyczne obowiązujące lub zalecane w różnych krajach wskazują dwutlenek 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.

Na podstawie przeglądu literatury (*Raport stanowiący przegląd literatury w zakresie dotychczas przeprowadzonych badań w szkołach na terenie polski pod kątem stężenia dwutlenku węgla*) i przeprowadzonych badań w ramach niniejszego raportu 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.

Wargocki i in. (2020) przeanalizowali opublikowane dotychczas badania dotyczące pomiarów CO₂ w szkołach pod kątem wydajności poznawczej 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 do 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 jakości powietrza. 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.

Badania przeprowadzone w ramach raportu dodatkowo pozwoliły na sformułowanie kolejnego wniosku, że sporadyczne czynności związane z wietrzeniem sal jedynie chwilowo poprawiają jakość powietrza wewnętrznego. Ponadto w salach, gdzie uczniowie rzadko opuszczają klasę, otwieranie okien w sezonie grzewczym jest krótkotrwałe. Uważa się bowiem, że niesie za sobą ryzyko wzrostu przeziębień wśród dzieci.