Instytut Techniki Cieplnej

Wydział Mechaniczny
Energetyki i Lotnictwa

Badanie i ocena funkcjonowania systemu wentylacji miejscowej z odzyskiem ciepła Respireco

Raport nr 1/ZChiEB/1131/

mgr inż. Adam Szelągowski
dr inż. Andrzej Grzebielec

Warszawa
03.08.2020

Adam Szelągowski
Andrzej Grzebielec

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ
im. Bohdana Stefanowskiego
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25
tel. 825 69 65 fax 825 05 65
NIP 525-000-58-34

Politechnika
Warszawska

ul. Nowowiejska 21/25
00-665 Warszawa
tel. 22 825 69 65
tel. 22 234 52 36
fax 22 825 05 65
www.itc.pw.edu.pl
dyrekcja@itc.pw.edu.pl

Spis treści

Przedmiot badania 3
Charakterystyka systemu wentylacji Respireco 3
Charakterystyka urządzenia Respireco 1000 3
Układ wentylacji Respireco poddany badaniom 5
Wydajność wentylacyjna systemu Respireco 6
Badania terenowe 9
Warunki wewnątrz pomieszczeń 9
Praca systemu wentylacji Respieco 10
Praca systemu odniesienia – mechaniczna wentylacja wywiewna 10
Instrumentarium pomiarowe 12
Układ pomiarowy 1 12
Układ pomiarowy 2 12
Wyniki pomiarów 13
Pomiary parametrów powietrza 13
Analiza parametrów powietrza 19
Dwutlenek węgla 19
Pyły zawieszone 19
Temperatura powietrza 20
Pomiary ciepłomierzy 21
Efektywność odzysku ciepła 22
Ocena systemu wentylacji Respireco 24
Lliteratura 27

Przedmiot badania

Przedmiotem badania jest innowacyjny system wentylacji rewersyjnej z regeneracyjnym odzyskiem ciepła (Zgłoszenie Patentowe P.426578) *Respireco*. Badany system wentylacji *Respireco* zainstalowany został w jednej z sal dydaktycznych w Szkole Podstawowej nr 2, w Pleszewie (woj. wielkopolskie). Będący przedmiotem badania system wentylacji *Respireco* zainstalowany został w sali nr 8. W celu oceny działania, system wentylacji *Respireco* został porównany z systemem mechanicznej wentylacji wyciągowej z kompensacją powietrza wentylacyjnego za pomocą nawietrzników ściennych. Układ odniesienia znajduje się w identycznej co do wymiarów i usytuowania sali nr 7 znajdującej się w tej samej szkole. W okresie badań obie sale użytkowane były w podobny sposób (podobne obciążenie osób przebywających wewnątrz). Głównym założeniem badań było utrzymanie parametrów powietrza wewnętrznego spełniającego warunki komfortu termicznego z uwzględnieniem wymagań stawianych placówkom edukacyjnym. W szczególności temperatury wewnątrz pomieszczenia powyżej 18 °C, oraz zawartości dwutlenku węgla poniżej 1000 ppm. Wydajność systemów wentylacji w obu klasach była regulowana na podstawie ciągłego pomiaru stężenia dwutlenku węgla, którego górny dopuszczalny próg ustalono na 1000 ppm.

Prowadzone badania w szczególności miały na celu określenie skuteczności wentylacji rewersyjnej *Respireco* oraz ocenę jej wpływu na poprawę warunków wewnątrz pomieszczenia:

- utrzymania wewnątrz pomieszczenia niskiej zawartości CO_2,
- utrzymania stałej temperatury na poziomie 20 °C, oczyszczenia powietrza nawiewanego do pomieszczenia,
- zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania świeżego powietrza wentylacyjnego, dzięki wykorzystaniu regeneracyjnego odzysku ciepła.

Charakterystyka systemu wentylacji Respireco

System wentylacji *Respireco* jest innowacyjnym systemem wentylacji bezkanałowej z możliwością opcjonalnego montażu w systemie jednokanałowym. Działanie systemu Respireco opiera się na okresowym przełączaniu pracy jednostki – centrali wentylacyjnej pomiędzy trybami nawiewu świeżego powietrza z zewnątrz i wywiewu zużytego powietrza z wnętrza pomieszczenia. System wentylacji *Respireco* przewiduje zainstalowanie minimum dwóch jednostek *Respireco* zsynchronizowanych ze sobą w taki sposób, aby zapewnić ciągły przepływ powietrza w pomieszczeniach wentylowanych. Zainstalowane jednostki pracują względem siebie z przesunięciem fazy, tzn. gdy jedna jednostka dostarcza świeże powietrze do pomieszczenia, druga usuwa z niego powietrze „zanieczyszczone". Po upływie nastawionego interwału czasowego tryb pracy jednostek się zamienia. Jednostka, który dostarczała powietrze świeże, usuwa powietrze z pomieszczenia, a jednostka, która usuwała powietrze, dostarcza świeże powietrze z zewnątrz.

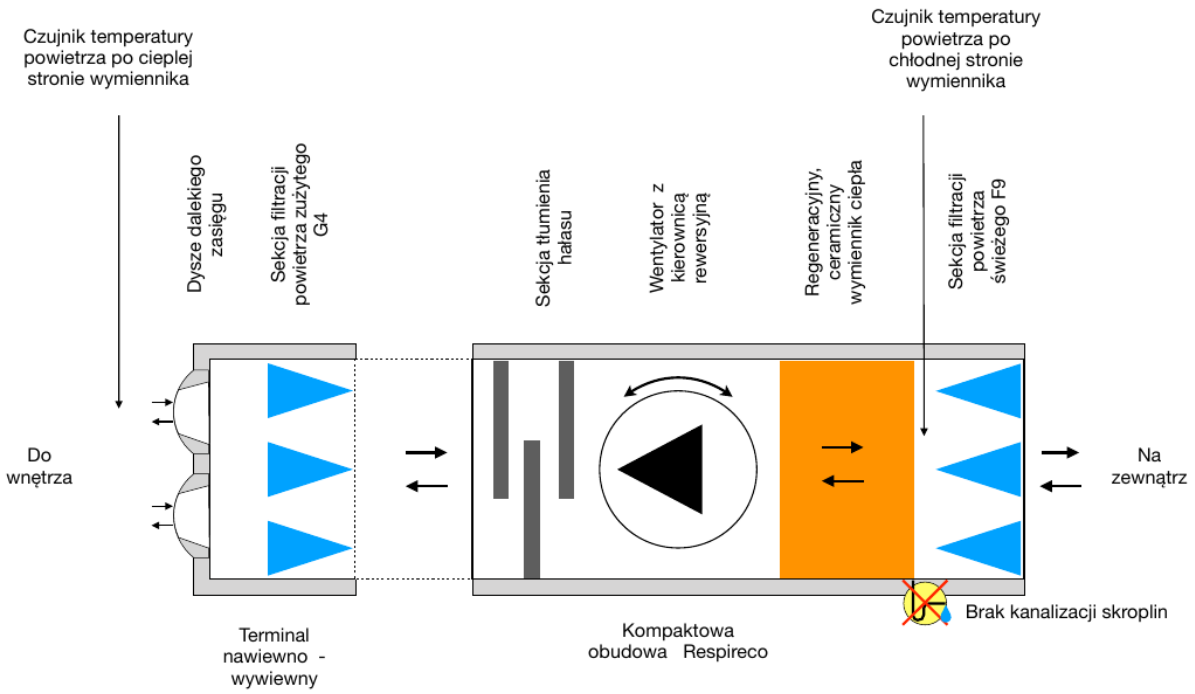
Charakterystyka urządzenia Respireco 1000

Prototypowe urządzanie *Respireco 1000* jest przeznaczone do systemu wentylacji bezkanałowej *Respireco* i stanowi zasadniczy jego element. Schemat jednostki *Respireco 1000* przedstawiony jest na rysunku nr 1. Urządzenie *Respireco 1000* pełni funkcję centrali wentylacyjnej pracującej naprzemiennie w trybie nawiewu i wywiewu. Przełączanie trybu pracy następuje w czasie wynoszącym 3 sekundy. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu opatentowanej technologii rewersu powietrza za pomocą obrotowej kierownicy powietrza co pozwala na szybkie zmiany zwrotu kierunku tłoczenia powietrza, bez konieczności zwalniania lub wyłączania wentylatora. Podczas zmiany kierunku przepływu powietrza wentylator cały czas pracuje z nastawioną prędkością, dzięki czemu system pracuje z niemal stałą wydajnością.

Każda jednostka *Respireco 1000* wyposażona jest w wentylator promieniowy RH25I-6ID.BD.CR z jednofazowym silnikiem EC o mocy nominalnej 500 W i płynnej regulacji obrotów, z wirnikiem o średnicy 250 mm, z łopatkami odgiętymi do tyłu, wykonanym w technologii ZAmid®, dzięki czemu cechuje się cichą pracą. Oprócz tego urządzenie jest wyposażone w tłumik hałasu wg oryginalnej koncepcji producenta urządzenia, co zapewnia dodatkowe wyciszenie pracującej jednostki.

Jednostki *Respireco 1000* wyposażone są w regeneracyjny wymiennik ciepła w postaci wkładu ceramicznego zainstalowanego w całym przekroju wewnętrznym urządzenia o wymiarach 700 × 380 mm. Łączny ciężar wymiennika to 96 kg, jego pojemność cieplna wynosi 84, 5 kJ/K. Regenerator pracuje w sposób okresowy. W warunkach zimowych, gdy temperatura na zewnątrz jest niższa niż temperatura wewnątrz pomieszczenia, gdy powietrze jest usuwane z pomieszczenia wentylowanego strumień usuwanego powietrza oddaje ciepło do masy akumulującej ciepło. Po zmianie kierunku przepływu powietrza chłodniejsze powietrze odbiera ciepło od masy akumulacyjnej dzięki czemu jest podgrzewane. Istotną cechą zastosowanego regeneratora jest, że w przewidywanych warunkach pracy nie występuje kondensacja pary wodnej dzięki czemu nie ma potrzeby odprowadzania skroplin, a w warunkach pracy zimą nie ma ryzyka oszronienia wymiennika (Regenerator był przedmiotem oddzielnych badań. Skrajne warunki badań wynosiły, dla warunków zewnętrznych: temperatura zewnętrzna -15 °C, wilgotność względna 100%, natomiast dla warunków wewnątrz: temperatura 20 °C, wilgotność względna 60%).

W celu filtracji powietrza wentylacyjnego oraz utrzymania urządzenia w czystości jednostki *Respireco 1000* wyposażone są w dwie oddzielne sekcje filtracyjne (jedna dla powietrza świeżego, druga dla powietrza usuwanego) z wymiennymi filtrami. W trybie nawiewu świeżego powietrza na wlocie jednostki *Respireco 1000* powietrze filtrowane jest przez filtry klasy F9. W trybie wywiewu powietrza zużytego powietrze przepływa przez filtry klasy G4. Odpowiedni przepływ powietrza przez filtry zapewniają klapy zwrotne kierujące przepływ powietrza w taki sposób, że w trybie nawiewu powietrze przepływa przez filtr F9 nie przepływa przez filtr G4. W trybie wywiewu powietrze przepływa przez filtr G4, nie przepływa przez filtr F9.



Rysunek 1. Schemat blokowy urządzenia wentylacyjnego Respireco

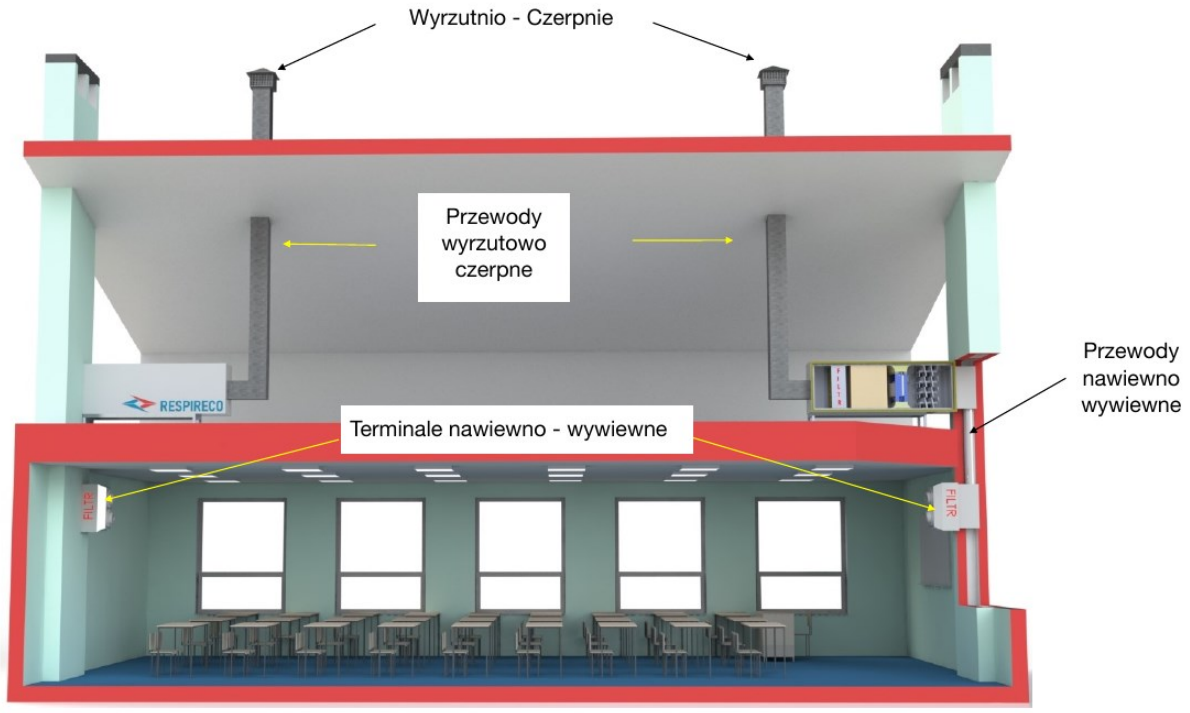
Układ wentylacji Respireco poddany badaniom

W badanym przypadku, system wentylacji Respireco zainstalowany został w Sali zajęciowej nr 8 w Szkole Podstawowej nr 2, w Pleszewie. Zainstalowane zostały dwie prototypowe jednostki *Respireco 1000*, które pracowały z przesunięciem fazy działania o 0,5 okresu pracy. Gdy jedna jednostka pracowała w trybie nawiewu (dostarczając świeże powietrze do pomieszczenia), druga pracowała w trybie wywiewu (usuwając zużyte powietrze z pomieszczenia), a przełączenie funkcji nawiew/wywiew obu jednostek następował w tej samej chwili. Dzięki takiemu rozwiązaniu zapewniono ciągłość wymiany powietrza wewnątrz pomieszczenia. Pełny cykl pracy wynosił 120 sekund (dla jednostek: 60 sekund w funkcji nawiewu i 60 sekund w funkcji wywiewu). Oba urządzenia wentylacyjne zamontowano na nieogrzewanym poddaszu, bezpośrednio nad badanym pomieszczeniem. Schemat instalacji przedstawiony jest na rysunku 2.

Króćce wewnętrzne każdego z urządzeń połączono z terminalami nawiewno-wywiewnymi zainstalowanymi wewnątrz pomieszczenia (dla każdej jednostki osobny terminal). Terminale zainstalowano w miejsce kratek wentylacji grawitacyjnej. Do połączenia jednostek *Respireco 1000* i terminali wewnętrznych wykorzystywano przewody wentylacji grawitacyjnej, każdy o średnicy 150 mm i długości 0, 8 m. Terminale wewnętrzne nawiewno-wywiewne zamontowano na przeciwległych ścianach. Każdy terminal wewnętrzny zawiera dwie dysze dalekiego zasięgu dla powietrza nawiewanego o średnicy nominalnej 250 mm i średnicy wylotu 135 mm.

Króćce zewnętrzne jednostek *Respireco 1000* połączono z czerpnio-wyrzutniami zainstalowanymi na dachu (czerpnio-wyrzutnie typu B – 500 × 500 mm, umieszczonej na cokole dachowym o wymiarach podstawy 500×500 mm i wysokości 400 mm). Połączenie wykonana za pomocą kanału izolowanego o przekroju kwadratowym 300 × 300 mm.

W przypadku nawiewu powietrza świeżego, powietrze przepływało przez filtry klasy F9, powietrze usuwane przepływało przez filtry G4.



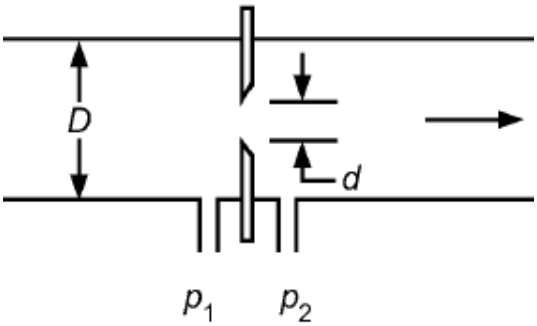
Rysunek 2. Schemat zainstalowanego systemu wentylacji Respireco

Wydajność wentylacyjna systemu Respireco

W ramach przeprowadzonych badań wykonano pomiary wydajności objętościowej strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego dla obu jednostek. Pomiary wykonano metodą kryz pomiarowych. Pomiary wykonano na terminalach znajdujących się wewnątrz klasy. Ponieważ każdy terminal wyposażony jest w dwie dysze, dokonano symultanicznego pomiaru na obu dyszach. Na rysunku nr 3 przedstawione jest zdjęcie aparatury pomiarowej w trakcie pomiaru.

Rysunek 3. Pomiar wydatku objętościowego na terminalu wewnętrznym systemu wentylacji Respireco

Pomiar natężenia przepływu z wykorzystaniem kryzy pomiarowej oparty jest na zmianie ciśnienia statycznego związanej ze stosunkowo nagłymi zmianami w obszarze odcinka przewodu.



Rysunek 4. Schemat układu do pomiaru wydatku objętościowego wykorzystując kryzę

Natężenie przepływu jest proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego różnicy ciśnień w króćcach przy tarczowych (ciśnienia p1 i p2) wynikającej z przepływu płynu. W przypadku pomiaru przepływu gazów uwzględnia się ściśliwość gazu (współczynnik ekspansji).

$$Q_t = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{m^2}{1-m^2} \cdot \frac{2\Delta p}{\rho}}$$

gdzie:

moduł zwężki

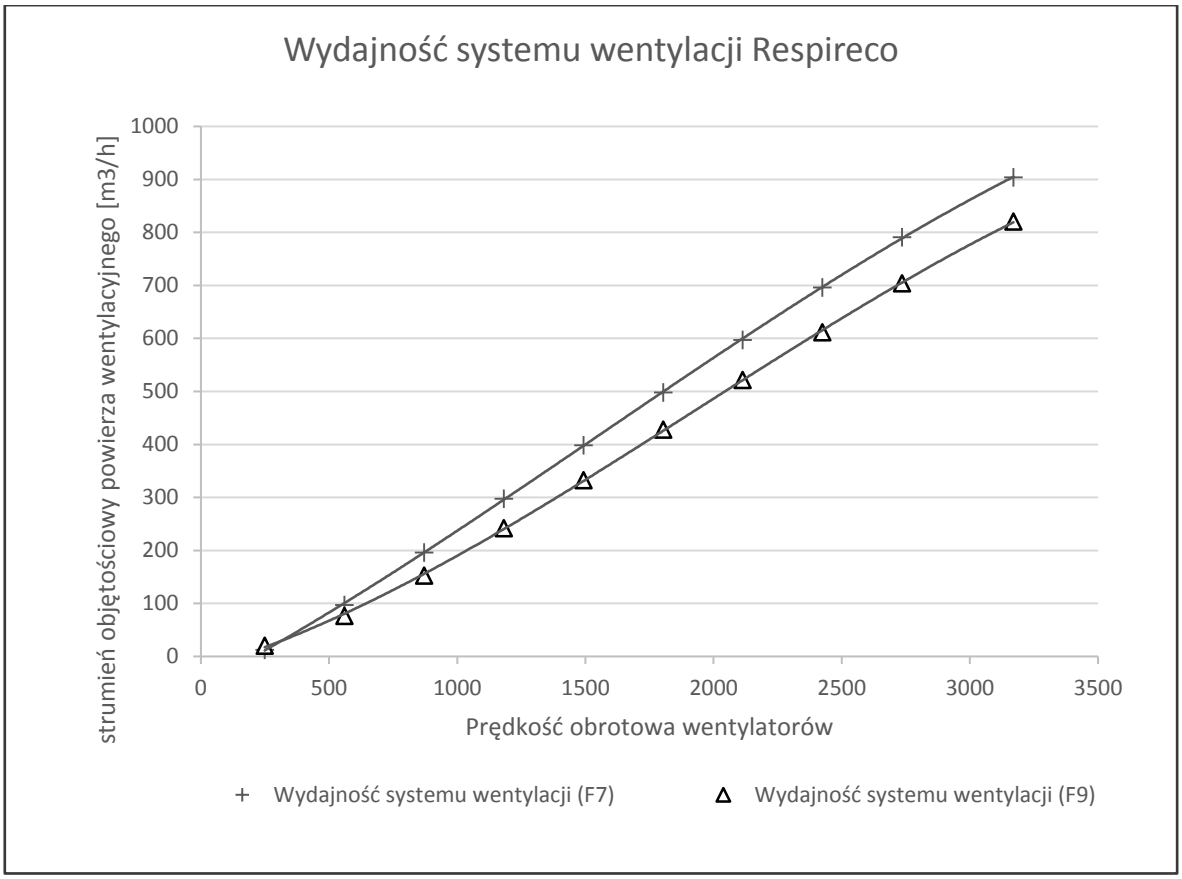
$$m = \frac{d^2}{D^2}$$

liczba ekspansji można wyznaczyć z zależności

$$\varepsilon = 1 - (0{,}3707 + 0{,}3184 \cdot m^2) \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}\right]^{0{,}935}$$

k - współczynnik izentropy, dla powietrza $k = 1{,}4$.

Wyniki pomiarów pozwoliły wyznaczyć charakterystykę wydajności objętościowej wymienianego powietrza zainstalowanego system wentylacji Respireco. Charakterystyki wyznaczono dla dwóch przypadków zainstalowanych filtrów oczyszczających powietrze nawiewane (klasy F7 i klasy F9). Wyznaczone charakterystyki przedstawiono na rysunku 5.

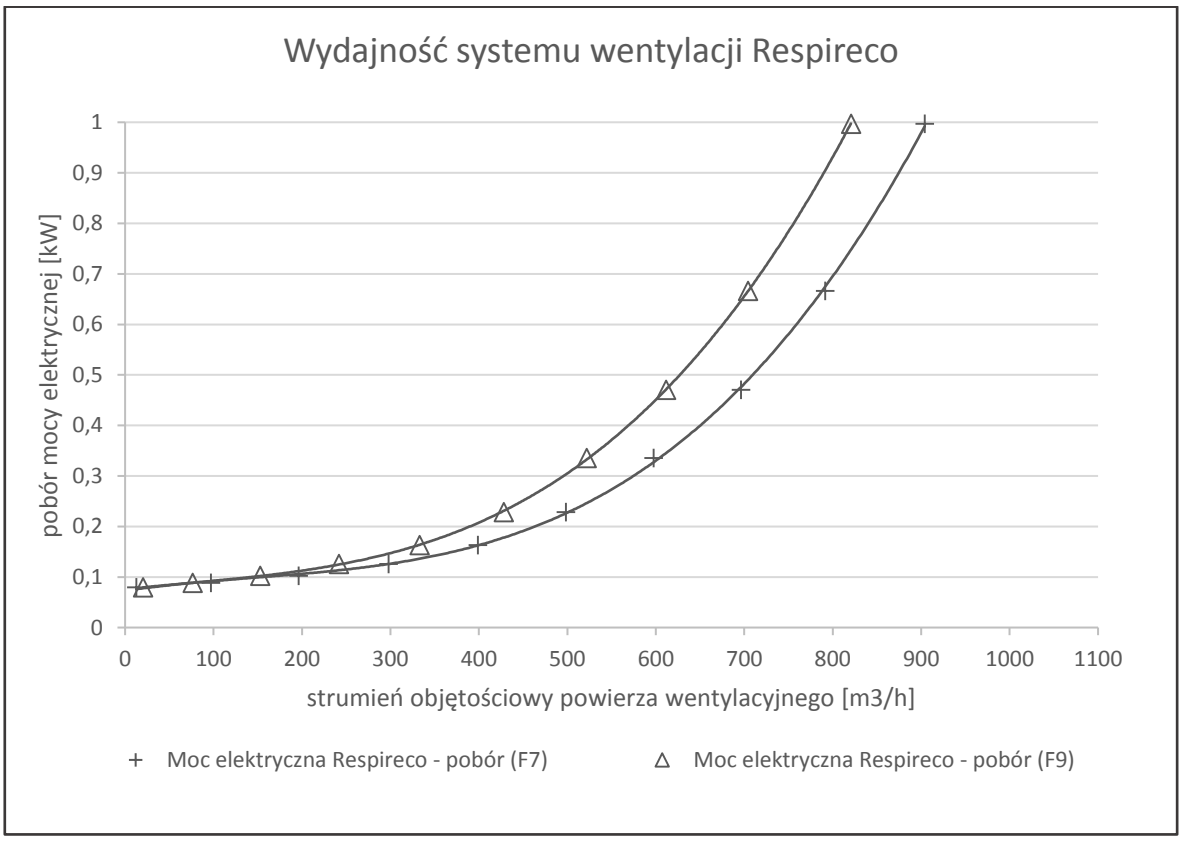


Rysunek 5. Strumień powietrza wymienianego przez system Respireco w funkcji prędkości obrotowej wentylatorów

Tabela 1. Pobór mocy elektrycznej badanego systemu wentylacji Respireco (złożonego z dwóch central *Respireco 1000*)

Prędkość obrotowa wentylatorów [rpm]	Strumień wymienianego powietrza [m^3/h]	
	Filtr klasy F7	Filtr klasy F9
559	97	76
870	196	153
1181	298	242
1492	399	333
1803	498	428
2113	597	522
2424	696	612
2735	791	704
3170 (maksymalna nastawa)	904	820

Wykonano również pomiary wielkości elektrycznych dla różnych wydajności przepływu powietrza, które posłużyły do wyznaczenia charakterystyki zapotrzebowania na moc elektryczną potrzebną na pracę systemu wentylacji *Respireco*. Głównymi elementami pobierającymi energię są dwa wentylatory zainstalowane po jednym w każdej jednostce Respireco 1000. Znamionowa moc elektryczna zastosowanego wentylatora wynosi 500 W.



Rysunek 6. Pobór mocy elektrycznej przez system Respireco w zależności od strumienia objętościowego wymienianego powietrza i klasy filtra po stronie powietrza nawiewanego

Tabela 2. Pobór mocy elektrycznej badanego systemu wentylacji Respireco (złożonego z dwóch central *Respireco 1000*)

Strumień wymienianego powietrza [m^3/h]	Pobór mocy elektrycznej przez system wentylacji Respireco [W]	
	Filtr klasy F7	Filtr klasy F9
100	97	94
200	117	116
300	145	154
400	193	220
500	273	326
600	397	484
700	577	706
800	825	1004
900	1153	-

Badania terenowe

Badanie prowadzono w dwóch identycznych pomieszczeniach – salach nr 7 i nr 8 w Szkole Podstawowej im. Królowej Jadwigi nr 2 w Pleszewie. Obie klasy położone są na ostatnim, drugim piętrze, z oknami od strony południowej. Klasy mają wymiary 9,00 × 5,60 m i wysokość 3,35 m, co daje kubaturę pomieszczenia wynoszącą 168,84 m^3. W każdej z klas są 4 okna skierowane na południe o wymiarach 1,77 × 2,1 m. Łączna powierzchnia okien wynosi 14,7 m^2. Okna wykonane są w technologii PCV. Obie klasy maja po jednej ścianie zewnętrznej grubości 54 cm (mur z cegieł o grubości to 43 cm, izolacja o grubość 11 cm). W obu klasach strop ocieplony jest wełną mineralna o grubości 12 cm rozłożonej na nieocieplonym poddaszu.

Warunki wewnątrz pomieszczeń

Badanie miało na celu określenie skuteczności działania systemu wentylacji Respireco poprzez zapewnienie w badanym pomieszczeniu (sala zajęciowa w szkole podstawowej) prawidłowych (zgodnych z wymogami i zaleceniami) parametrów powietrza, tj.: temperatury, wilgotności i prędkości oraz stężenia dwutlenku węgla.

Zgodnie z wymogami prawnymi stawianymi jednostkom edukacyjnym temperatura w miejscach, w których odbywają się zajęcia (sale lekcyjne) musi wynosić minimum 18°C. Strumień powietrza wentylacyjnego na jedną osobę powinien wynosić 20m^3/h. W przypadku stężenia dwutlenku węgla (CO_2), obecnie w prawodawstwie krajowym nie ma osobno wyszczególnionych wymogów dla obiektów edukacyjnych [1,2,3,4]. W tej kwestii szkoły podlegają ogólnym przepisom BHP, które dopuszczają stężenie CO_2 do 4600 ppm, które co prawda nie jest niebezpieczne dla organizmu ludzkiego, ale tak wysoki poziom CO_2 znacznie pogarsza koncentrację i samopoczucie [3,4].

Zgodnie z zaleceniami ekspertów poziom dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym uważany za zdrowy, komfortowy dla człowieka i umożliwiający normalne funkcjonowanie wynosi 1000 ppm. Dostosowując się do tego zalecenia, **głównym założeniem działania systemu wentylacji Respireco stało się utrzymanie poziomu dwutlenku węgla na poziomie nieprzekraczającym 1000ppm**, nie

pogarszając przy tym pozostałych parametrów powietrza wewnątrz pomieszczenia tj. temperatury, wilgotności, prędkości przepływu powietrza w Sali.

Praca systemu wentylacji Respieco

Urządzenia *Respireco 1000* pozwalają na bezstopniową regulację ich pracy. W badaniu zdecydowano się na ustawienie dwustopniowego trybu pracy, tj. ustawiono dwa biegi pracy. Niższy bieg ustalony został przy prędkości obrotowej wentylatorów wynoszącej 1492 rpm co zapewniało strumień wymienianego powietrza na poziomie 330 m^3/h. Wyższy bieg ustalony został przy prędkości obrotowej wentylatorów wynoszącej 2735 rpm co zapewniało strumień wymienianego powietrza na poziomie 700 m^3/h. Obroty obu współpracujących wentylatorów w każdej chwili były jednakowe. Zmiana trybu pracy (przełączanie biegu pracy wentylatorów z niższego na wyższy i odwrotnie) regulowane były na podstawie stężenia dwutlenku węgla (CO_2). W przypadku przekroczenia stężenia CO_2 w wysokości 600 ppm załączany był wyższy bieg. Przełączenie na niższy bieg następował, gdy stężenie CO_2 spadło do poziomu 500 ppm.

Tabela 3. Charakterystyka pracy wentylacji w sali nr 8 (system wentylacji Respireco)

Bieg	Wydatek powietrza świeżego doprowadzonego do pomieszczenia [**m^3/h**]
I (1492 rpm)	**330**
II (2424 rpm) automatyczne przełączenie po przekroczeniu stężenia CO2 na poziomie 600 ppm	**880**

Praca systemu odniesienia – mechaniczna wentylacja wywiewna

W celu oceny systemu wentylacji mechanicznej *Respireco* porównano go z systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej. System porównawczy zainstalowany jest w tym samym budynku, w którym zainstalowano system Respireco budynek szkoły podstawowej nr 2 w Pleszewie). System porównawczy zainstalowany jest w sąsiadującej sali nr 7 identycznej jak sala nr 8 (*system Respireco*). Pierwotnie był to system wentylacji grawitacyjnej wyciągowej wentylacji grawitacyjnej z nawietrznikami kompensującymi strumień powietrza usuwanego. **Wentylacja grawitacyjna nie spełniała jednak podstawowego założenia badania – utrzymanie stężenia dwutlenku węgla na poziomie nieprzekraczającym 1000 ppm.** Zdecydowano się na wprowadzenie modyfikacji i przekształcono system wentylacji grawitacyjnej w mechaniczną wentylację wywiewna bez odzysku ciepławy. Zastosowano wentylator wywiewny Ziehl-Abegg RH25I, przyłączony do czterech kanałów wentylacji grawitacyjnej. Kompensację świeżego powietrza zapewniał pierwotny układu dopływu powietrza świeżego - trzy otwory o wymiarach 200×70 mm (w ścianie pod oknami). Po zapewnieniu odpowiedniego strumienia powietrza świeżego stwierdzono trudności w utrzymaniu temperatury w pomieszczeniu na wymaganym poziomie. W celu uniknięcia chłodnych „przeciągów" zamontowano trzy dodatkowe grzejniki i wykonano trzy dodatkowe otwory nawiewne o średnicy 100 mm we wkładkach zastępujących szyby w dwóch skrzydłach okiennych o wymiarach 400×700 mm. Wloty powietrza świeżego zasysanego do klasy doprowadzono w bezpośrednie sąsiedztwo podwójnych grzejników. Po modyfikacji łączna powierzchnia otworów kompensacyjnych wyniosła 0,12 m^2. Sytuację przedstawia rysunek 7.

Rysunek 7. Sala nr 7 – dodatkowe grzejniki oraz wloty powietrza świeżego

Wentylator wyciągowy pracował w dwóch trybach (dwie prędkości), których przełączanie uzależnione było pomiarem stężenia CO_2 w pomieszczeniu. Bieg pierwszy - wentylator pracował z obrotami 900 rpm, co odpowiadało ilości nawiewanego i wywiewanego powietrza 160 m^3/h. Bieg drugi - 2424 rpm, co zapewniało strumień nawiewanego świeżego powietrza w ilości 880 m^3/h. Obroty wentylatora regulowane były na podstawie stężenia CO_2, w taki sposób, że zmiana biegu następowała natychmiast po przekroczeniu stężenia CO_2 w wysokości 600 ppm, a przełączenie na bieg niższy następował automatycznie wskutek spadku stężenia spadku CO_2 do poziomu 500 ppm.

Tabela 4. Charakterystyka pracy wentylacji w sali nr 7 (system odniesienia – wyciągowa wentylacja mechaniczna z kompensacją świeżego powietrza przez nawietrzniki ścienne)

Bieg	Wydatek powietrza świeżego doprowadzonego do pomieszczenia [**m^3/h**]
I (900 rpm)	**160**
II (2424 rpm) automatyczne przełączenie po przekroczeniu stężenia CO2 na poziomie 600 ppm	**880**

Instrumentarium pomiarowe

W czasie wykonywania pomiarów pomieszczenia były normalnie eksploatowane. Podczas badań mierzono temperaturę, wilgotność, stężenie dwutlenku węgla oraz stężenie pyłów zawieszonych PM2,5 w obu badanych pomieszczeniach (sala nr 8 wyposażona w system wentylacji *Respireco*, sala nr 7 wyposażona w wyciągową wentylację mechaniczną) oraz na zewnątrz budynku. Mierzono również zużycie ciepła na cele ogrzewania obu badanych pomieszczeń. Do pomiarów zbudowano dwa niezależne autorskie układy pomiarowe jak i również opracowana dwa niezależne systemy rejestru i archiwizacji danych (oddzielny dla każdego układu pomiarowego).

Na grzejnikach znajdujących się wewnątrz pomieszczeń zainstalowano Ciepłomierze Hydrocal M3 (6 sztuk po trzy na każdą z badanych sal) dla klasy nr 7 (ciepłomierze 7.1, 7.2 i 7.3) i w klasie 8 (ciepłomierze 8.1, 8.2 i 8.3). W chwili rozpoczęcia prowadzenia pomiarów wszystkie ciepłomierze były nowe i wskazywały stan liczników 0,00 GJ. Pomiaru zużycia energii cieplnej dokonywano poprzez cotygodniową rejestracje wartości wskazań ciepłomierzy. Zużycie ciepła w badanych pomieszczeniach obliczano sumując odczyty wszystkich ciepłomierzy zainstalowanych w danej sali. Przy każdym rejestrowaniu wskazań ciepłomierzy prowadzono również dokumentację fotograficzną.

W celu zapewnienia jednakowych temperatur w obu badanych klasach, na zaworach zasilających każdej linii zasilania grzejników zainstalowano system Danfoss Smart Heat składający się z centralnego sterownika Danfoss Link, 6 głowic termostatycznych i termostatów DEVIIlink TS.

Układ pomiarowy 1

W układzie pomiarowym 1 zastosowano czujniki Hygrosens TS-NTC-833 z rodziny NTC (ang. negative theral coefficient), firmy B+B Thermo-Techink. Pomiar temperatury następował wewnątrz centrali Respireco 1000 przed i za wymiennikiem regeneracyjnym, w terminalu nawiewnym wewnątrz sali nr 8 (Respireco), oraz w puszkach naściennych w sali nr 8 (Respireco) i w sali nr 7 (wyciągowa wentylacja mechaniczna). Do pomiarów stężenia dwutlenku węgla użyto czujniki S-300G-3V2 firmy ELT SENSOR. Czujnik ten działa na zasadzie NDIR – bez dyspersyjnej absorpcji podczerwieni, co jest standardowym podejściem przy badaniu stężeń CO_2 na potrzeby HVAC. Czujniki umieszczono w obu badanych pomieszczeniach. Były one okresowo (zdalnie) rozkalibrowane do wartości referencyjnej, która producent przyjął na poziomie 400 ppm. Kalibracja miała miejsce w dni wolne od zajęć lekcyjnych, po intensywnym wietrzeniu pomieszczeń, by mieć pewność wyrównania stężenia CO_2 w salach lekcyjnych ze stężeniem typowym dla otwartego powietrza. Do pomiaru stężeń pyłów zawieszonych użyto komercyjne urządzenia firmy Syngeos (https://syngeos.pl/). Jednostki pomiarowe Syngeos zainstalowano w obu badanych pomieszczeniach oraz na zewnątrz budynku.

Tabela 5. Czujniki i przetworniki sygnałów pomiarowych - Układ Pomiarowy 1

Lp.	Nazwa	Typ/Model
1	Czujniki temperatury	Hygrosens TS-NTC-833 (B+B Thermo-Techink)
2	Czujnik CO_2	S-300G-3V2 (ELT SENSOR)
3	Czujnik PM2.5	Syngeos
4	Czujnik PM10	

Układ pomiarowy 2

W układzie pomiarowym 2 zastosowano cyfrowe czujniki temperatury i wilgotności DHT21 (AM2301). Czujniki zainstalowane zostały na ścianach w obu badanych salach (po 4 czujniki na badane pomieszczenia) oraz na zewnątrz (w obudowach ochronnych). Do pomiarów stężenia

dwutlenku węgla użyto cyfrowe czujniki Gravity Infrared co2 sensor v1.1. Czujnik ten działa na zasadzie NDIR. Do pomiaru stężeń pyłów zawieszonych PM2.5 zastosowano czujnik Sensirion sps30. Czujniki stężenia CO2 i PM2.5 umieszczono w obu badanych pomieszczeniach (po jednym czujniku danego typu na pomieszczenie) w puszkach naściennych, oraz na zewnątrz w obudowach ochronnych (po 2 czujniki w dwóch niezależnych obudowach ochronnych). Do rejestracji danych z czujników w układzie pomiarowym 2 wykorzystano platformę Arduino i autorski program. Dane rejestrowane byłu z częstotliwością wynoszącą 1 s.

Tabela 6. Czujniki i przetworniki sygnałów pomiarowych - Układ Pomiarowy 2

Lp.	Nazwa	Typ/Model
1	Czujniki temperatury i wilgoci	DHT21 (AM2301)
2	Czujnik CO_2	Gravity Infrared co2 sensor v1.1
3	Czujnik PM2.5	Sensirion sps30

Wyniki pomiarów

Pomiary parametrów powietrza

Na rysunkach 8-22 dla wybranych okresów, przedstawiono zarejestrowane wartości parametrów powietrza panujących na zewnątrz oraz obu badanych pomieszczeniach: sali nr 7 - z mechaniczną wentylacją wyciągową, sali nr 8 – z wentylacją Respireco.

Prezentowane parametry to:

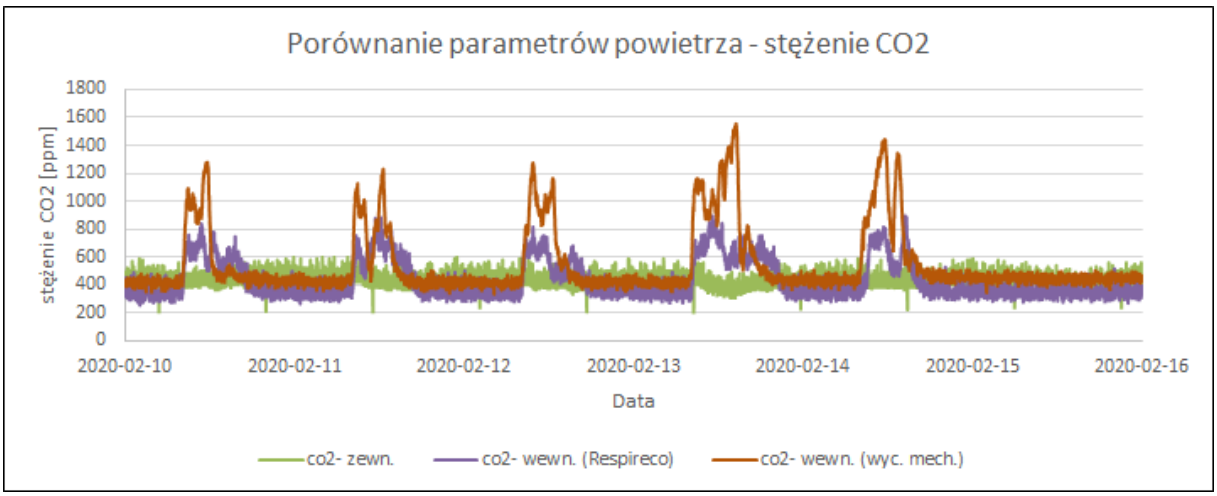
Stężenie dwutlenku węgla (CO2) wyrażone w ppm. Wartości wyrażone w ppm (ang. parts per million) wyrażają liczbę części na milion, oznaczenie stosowane przy wyrażaniu stężeń substancji wysoce rozrzedzonych takich jak właśnie zawartość CO2 w powietrzu atmosferycznym, 1 ppm = 0,0001% objętościowo. Obecnie jako średnią światową wartość zawartości CO2 w powietrzu atmosferycznym określa się na poziomie 399,5 ppm.

Stężenie pyłów zawieszonych oznaczanych jako PM2.5 wyrażone w $\mu g/m^3$ (mikrogramy na metr sześcienny). Pyły o oznaczeniu PM2.5 to aerozole atmosferyczne, których średnica nie jest większa niż 2,5 mikrometra. Tego rodzaju pył zawieszony jest uznawany za najgroźniejszy dla zdrowia człowieka. Wszystko dlatego, że pył jest bardzo drobny. Polskie normy nie określają maksymalnych stężeń dla pyłów PM2.5 Natomiast normy stężeń pyłu zawieszonego PM2.5 zalecane przez Światową Organizację Zdrowia wynoszą dla:

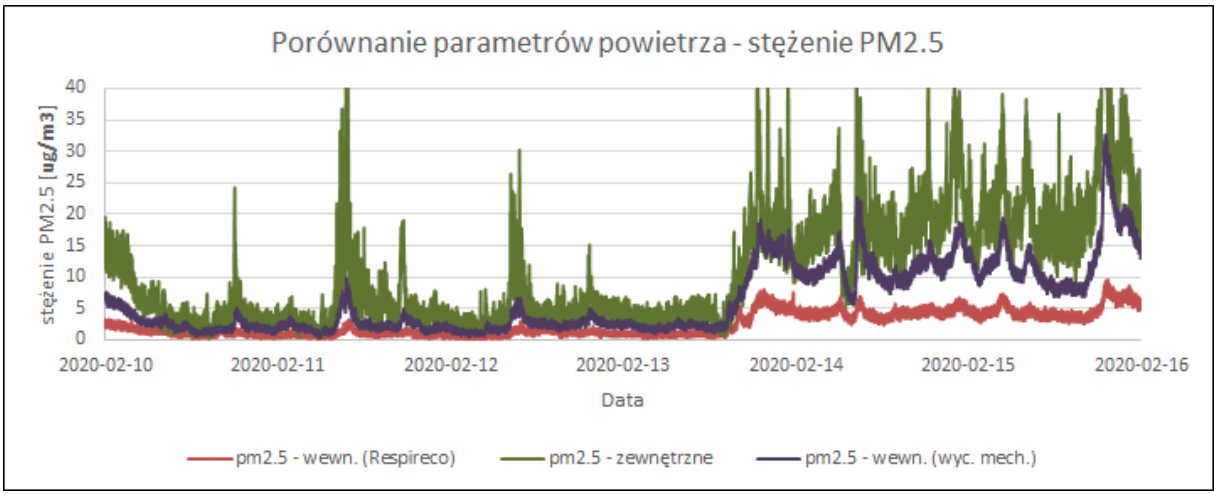
- stężenia 24-godzinne PM2,5 – 25 $\mu g/m^3$,
- stężenia średnioroczne PM2,5 – 10 $\mu g/m^3$.

Według Światowej Organizacji Zdrowia długotrwałe narażenie na działanie pyłu PM2.5 skraca życie statystycznego mieszkańca UE o ponad 8 miesięcy, a w przypadku mieszkańców Polski – aż o 10 miesięcy.

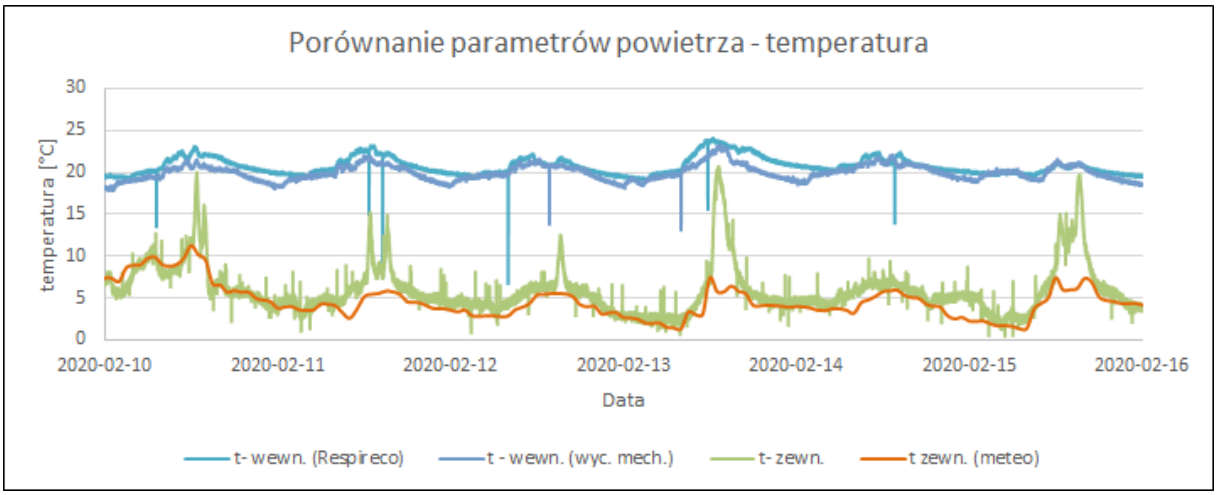
Temperatura powietrza wg termometru suchego.



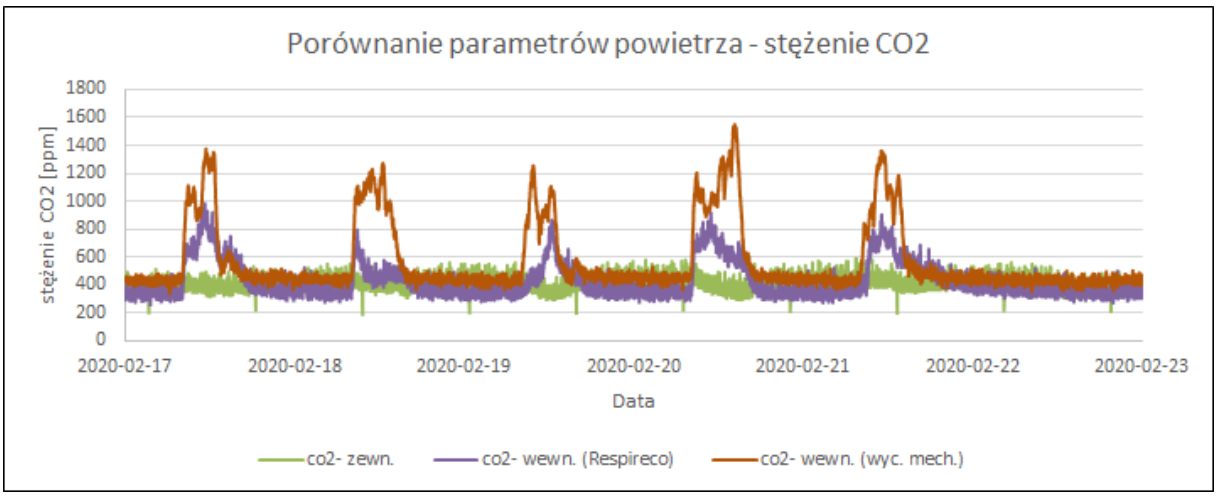
Rysunek 8. Odnotowane wartości stężenia CO2 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 10-16 lutego 2020



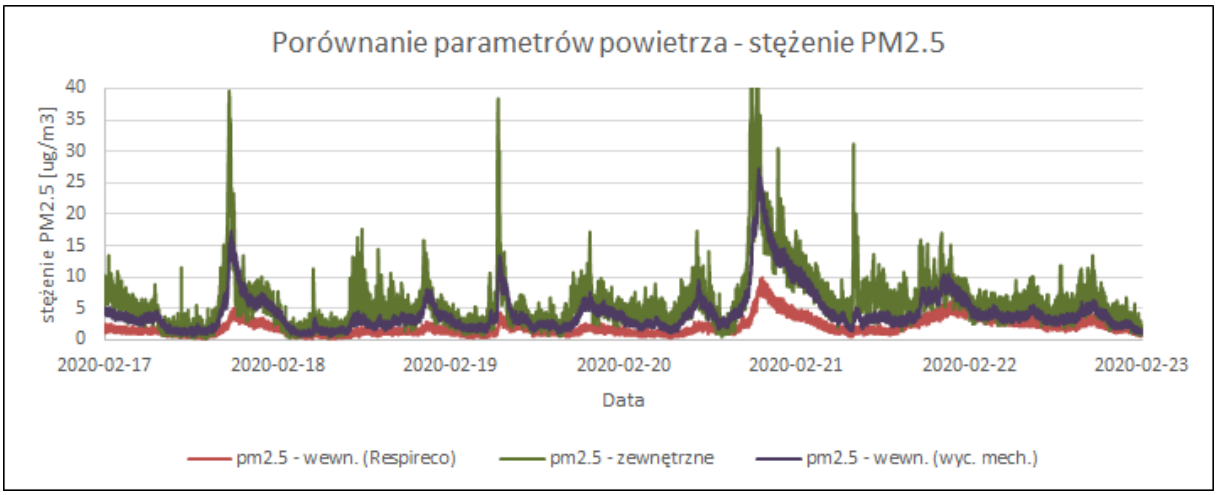
Rysunek 9. Odnotowane wartości stężenia pyłu zawieszonego PM2.5 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 10-16 lutego 2020



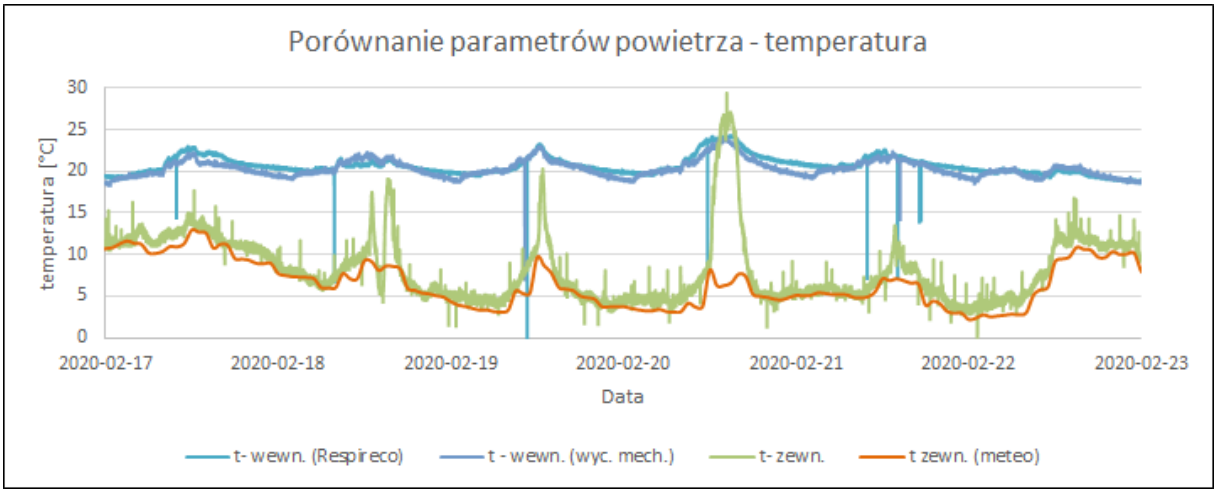
Rysunek 10. Odnotowane wartości temperatury (wg termometru suchego) dla powietrza zewnętrznego oraz obu badanych sal (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 10-16 lutego 2020



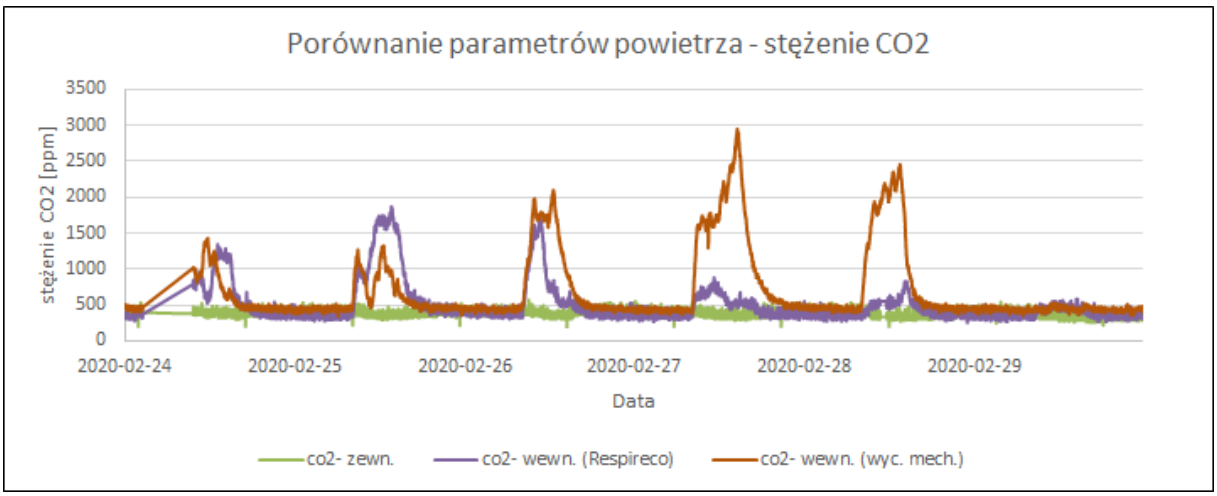
Rysunek 11. Odnotowane wartości stężenia CO2 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 17-23 lutego 2020



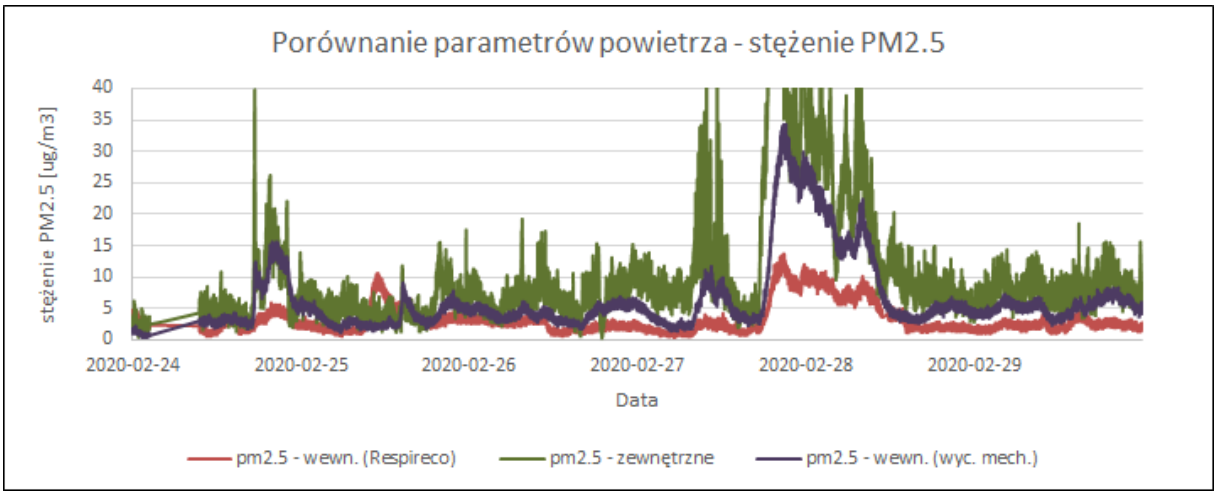
Rysunek 12. Odnotowane wartości stężenia pyłu zawieszonego PM2.5 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 17-23 lutego 2020



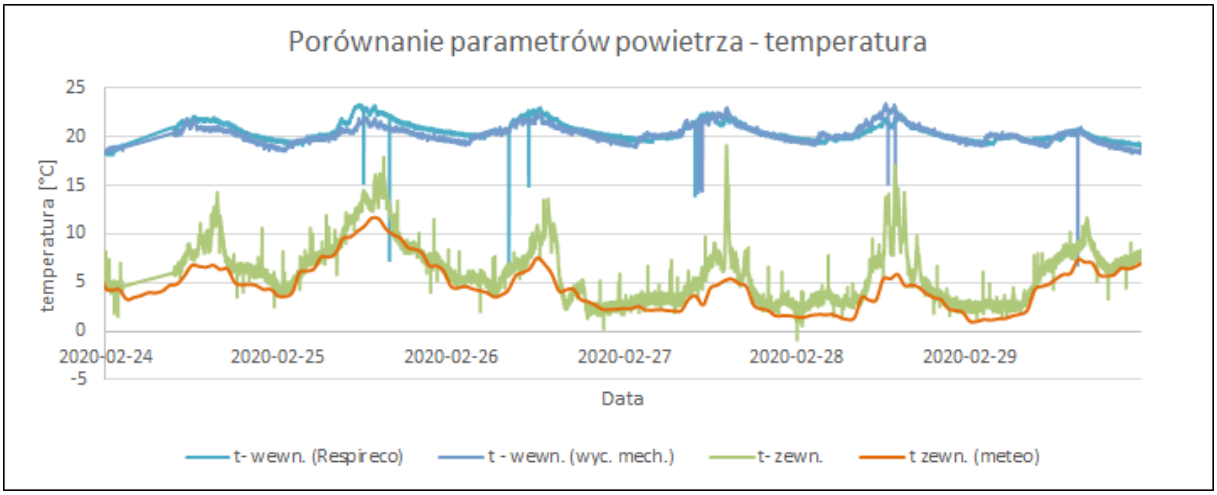
Rysunek 13. Odnotowane wartości temperatury (wg termometru suchego) dla powietrza zewnętrznego oraz obu badanych sal (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 17-23 lutego 2020



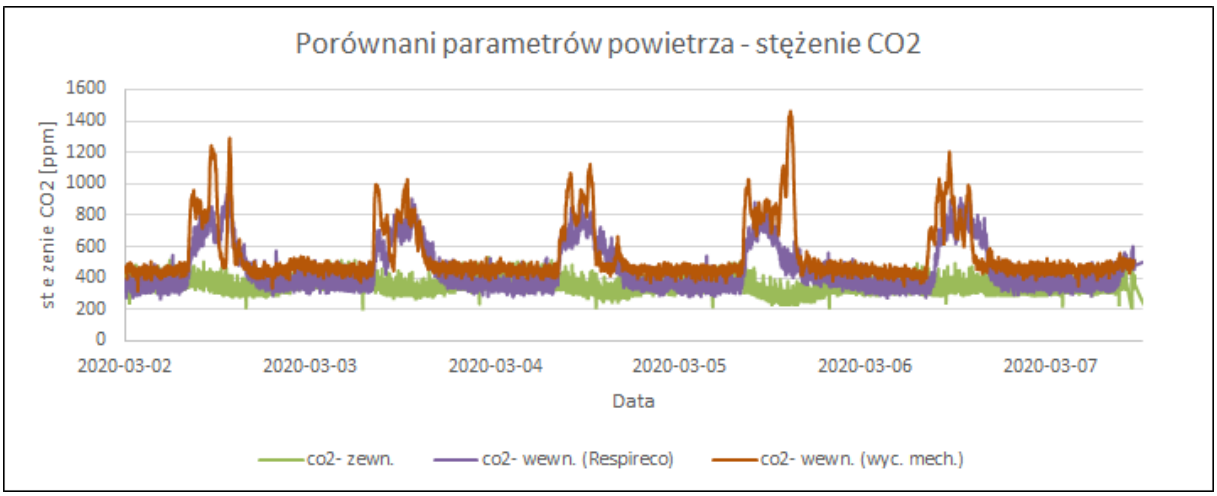
Rysunek 14. Odnotowane wartości stężenia CO2 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 24-29 lutego 2020



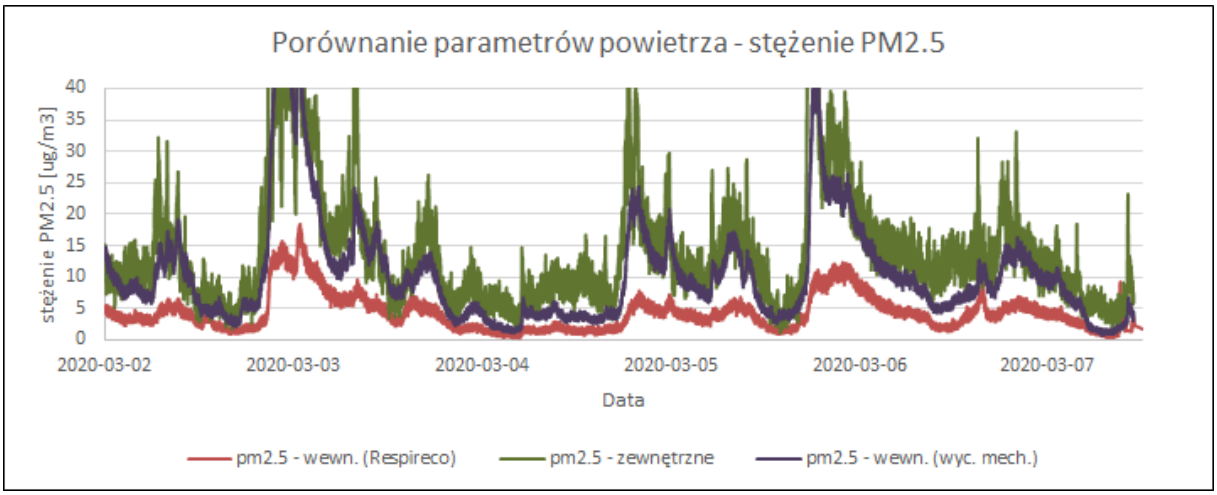
Rysunek 15. Odnotowane wartości stężenia pyłu zawieszonego PM2.5 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 24-29 lutego 2020



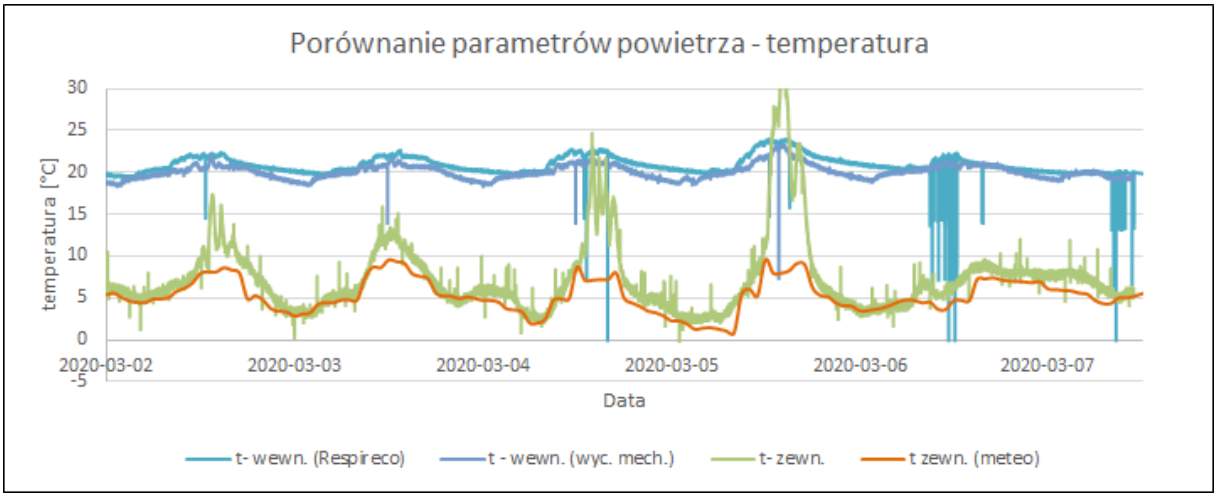
Rysunek 16. Odnotowane wartości temperatury (wg termometru suchego) dla powietrza zewnętrznego oraz obu badanych sal (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 24-29 lutego 2020



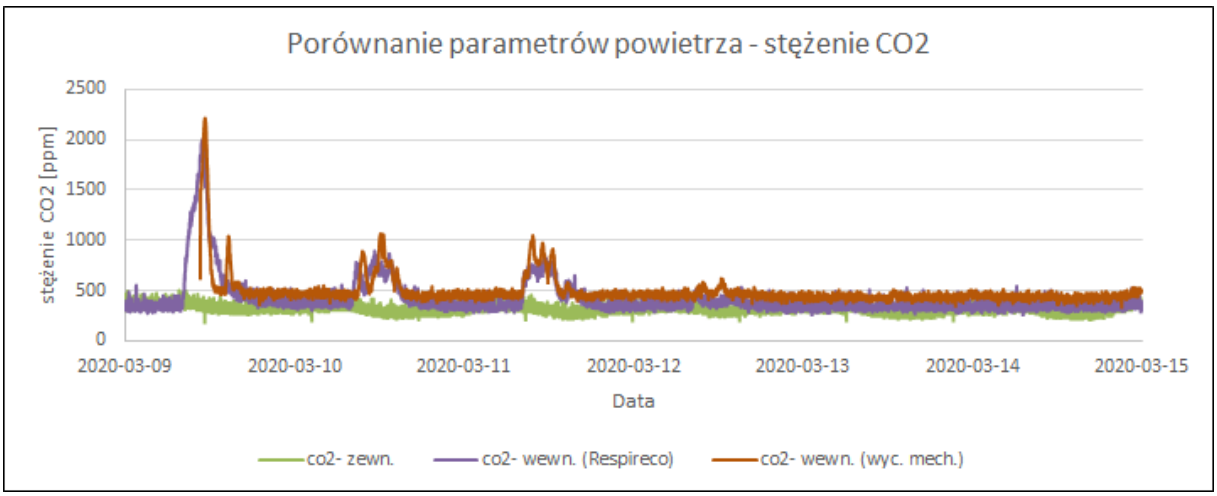
Rysunek 17. Odnotowane wartości stężenia CO2 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 2-7 marca 2020



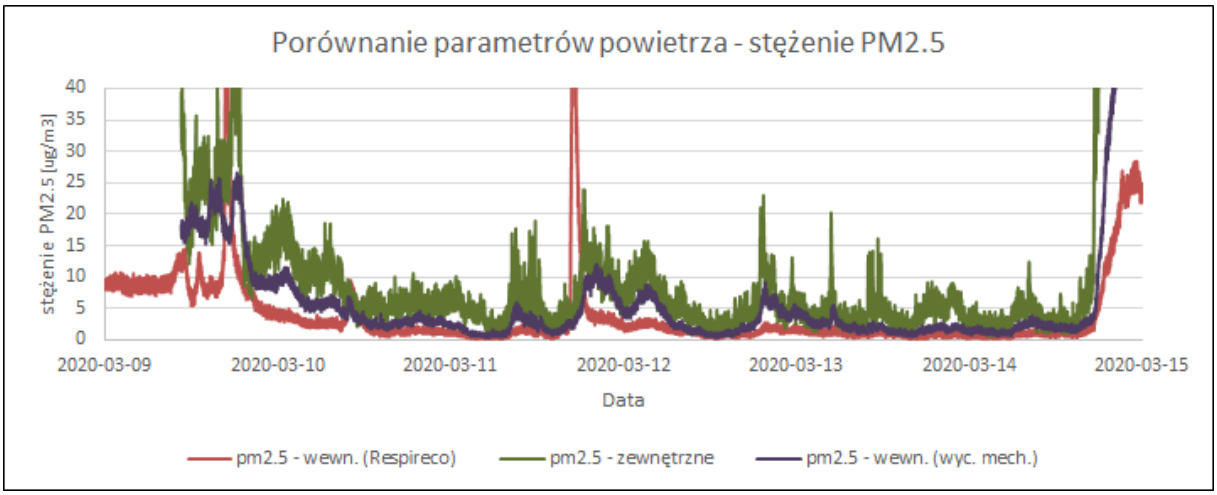
Rysunek 18. Odnotowane wartości stężenia pyłu zawieszonego PM2.5 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 2-7 marca 2020



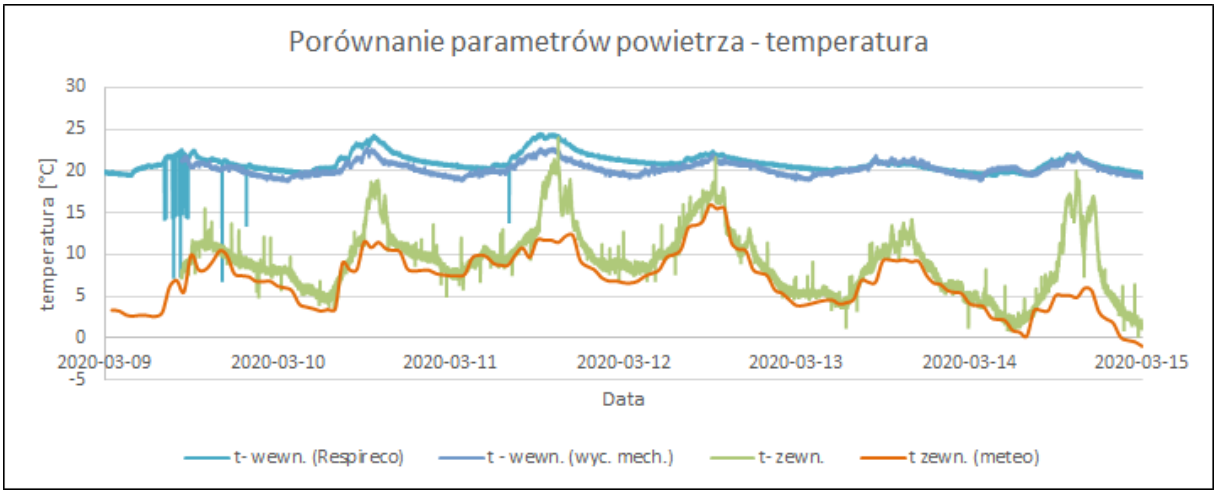
Rysunek 19. Odnotowane wartości temperatury (wg termometru suchego) dla powietrza zewnętrznego oraz obu badanych sal (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 2-7 marca 2020



Rysunek 20. Odnotowane wartości stężenia CO2 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 9-15 marca 2020



Rysunek 21. Odnotowane wartości stężenia pyłu zawieszonego PM2.5 w powietrzu zewnętrznym oraz obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 9-15 marca 2020



Rysunek 22. Odnotowane wartości temperatury (wg termometru suchego) dla powietrza zewnętrznego oraz obu badanych sal (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 9-15 marca 2020

Analiza parametrów powietrza

Dwutlenek węgla

Maksymalna liczba osób przebywających wewnątrz klasy wynosiła 30 osób. Zgodnie z krajowymi wytycznymi minimalna zalecana ilość powietrza wymienianego dla tej liczby osób wynosi 600 m^3/h. Oba systemy wentylacji (system wentylacji *Respireco* – sala nr 8, system mechanicznej wentylacji wyciągowej – sala nr 7) spełniały ten wymóg z naddatkiem zapewniając około 800 m^3/h wymienianego powietrza na drugim stopniu nastawy prędkości obrotowej wentylatorów dla obu badanych pomieszczeń. Oba systemy (*Respireco*, wentylacja mechaniczna wyciągowa) wentylacji sterowane były w oparciu o pomiar stężenia dwutlenku węgla wewnątrz pomieszczeń w których zostały zainstalowane., a sposób wysterowania był taki sam w obu systemach (przełączenie na wyższą wydajność systemu wentylacji po przekroczeniu 600 ppm CO_2 dla powietrza wewnętrznego). Analizując przebiegi zarejestrowanych parametrów stężenia CO2 w obu badanych salach, oraz na zewnątrz można stwierdzić, że oba systemy: system wentylacji *Respireco*, jak i mechaniczna wentylacja wywiewna spełniły swoją podstawową funkcję i zapobiegły przekroczeniu dopuszczalnego stężenia dwutlenku węgla ustalonego na poziomie 1000 ppm. W przypadku systemu wentylacji Respireco można zauważyć występowanie tylko jednego piku zarejestrowanego poziomu CO_2. W przypadku mechanicznej wentylacji wywiewnej obserwuje się stopniowo narastające piki zarejestrowanego poziomu CO2, tzn. po osiągnięciu wartości, która powodowała przełączenie wentylatora wyciągowego na wyższą nastawę obserwuje się gwałtowny wzrost zmierzonego stężenia CO2. Wytłumaczyć można to tym, że faktyczne średnie stężenie CO_2 w badanym pomieszczeniu jest wyższe niż zarejestrowane lokalnie w miejscu zainstalowania czujnika. Po zwiększeniu wydajności wentylacji następuje silniejsze wymieszanie powietrza wewnątrz pomieszczenia i wtedy odczyt w punkcie jest bardziej miarodajny dla całego powietrza wewnątrz pomieszczenia. Ponieważ system wentylacji *Respireco* cały czas intensywnie miesza powietrze w pomieszczeniu to rozrzedzenie zanieczyszczeń takich jak CO_2 jest równomierne dla całej objętości pomieszczenia.

Na rysunku 20 można zwrócić uwagę na znaczny wzrost zarejestrowanego poziomu CO_2 w obu badanych pomieszczeniach w dniu 09.03.2020. Po sprawdzeniu nastaw wentylatorów okazało się, że tego dnia oba systemy zawiesiły się przez co wentylatory w obu salach nie pracowały. System automatycznie się zresetował i kolejnego dnia oba systemy pracowały prawidłowo.

Pyły zawieszone

Centrale systemu wentylacji Respireco wyposażone są w kasety filtrujące. W analizowanym okresie, dla powietrza nawiewanego zainstalowane były filtry klasy F9. Powietrze usuwane przepływało przez filtry klasy G4. W przypadku usuwania powietrza filtry pełnią funkcję zabezpieczenia elementów wewnętrznych przed zanieczyszczaniem. Natomiast zadaniem filtrów na przepływie powietrza nawiewanego jest oczyszczenie powietrza świeżego. Skuteczność filtracji powietrza świeżego systemu *Respireco* oceniono na podstawie pomiaru stężenia pyłów zawieszonych PM2.5. Po przeanalizowaniu wybranych okresów określono stopień oczyszczenia powietrza z pyłów zawieszonych PM2.5. Wyznaczono względny stosunek (różnica zmierzonych wartości/wartość odniesienia) zmierzonego stężenia pyłów zawieszonych PM2.5 dla powietrza w sali z zainstalowanym systemem Respireco oraz powietrza zewnętrznego i porównywanej sali z wyciągową wentylacją mechaniczną bez filtracji powietrza świeżego. Wyniki analizy zawiera tabela 7.

Tabela 7. Ocena redukcji stężenia pyłów zawieszonych PM2.5 przez system wentylacji ***Respireco***

Analizowany okres	Redukcja stężenia PM2.5 **[%]**	
	względem powietrza zewnętrznego	względem sali bez filtracji
10.02.2020 – 16.02.2020	79,1	61,6
17.02.2020 – 23.02.2020	70,9	52,3
24.02.2020 – 01.03.2020	68,5	48,7
02.03.2020 – 08.03.2020	72,2	56,8
09.03.2020 – 15.03.2020	65,7	34,2
Średnia wartość z całego analizowanego okresu	**71,3**	**50,7**

Dla analizowanego okresu względny stopień filtracji powietrza świeżego w odniesieniu do pyłów zawieszonych PM2.5 wyniósł **71,3%.** Według zmierzonych wartości, stężenie pyłów zawieszonych PM2.5 było średnio **50,7%** niższe w sali z systemem wentylacji Respireco względem sali z wentylacją wyciągową, gdzie kompensacja świeżego powietrza następowała bez jego filtracji. Analizując przebiegi zmierzonych wartości stężenia pyłów zawieszonych PM2.5 (rysunki: 9, 12, 15, 18, 21) można stwierdzić, że skuteczność filtracji jest większa w przypadku występowania wysokich stężeń pyłów zawieszonych w powietrzu zewnętrznym. System wentylacji *Respireco* dzięki filtracji powietrza świeżego zapewnia zachowanie niskiego stężenia pyłów zawieszonych PM2.5 w wentylowanym pomieszczeniu przez co znacznie poprawia jego jakość.

Temperatura powietrza

Analizując pomiar temperatury zewnętrznej można dojść do wniosku, że ze względu na umiejscowienie czujników (na południowej ścianie budynku), pomiar temperatury zewnętrznej jest obarczony pewnym błędem związanym z intensywnością oddziaływania promieniowania słonecznego (znaczne „piki" temperatury, w godzinach okołopołudniowych). Nagrzanie obudowy, w której zainstalowano czujniki powoduje wzrost temperatury wewnątrz, zatem i wyższe wskazanie. Dotyczy to okresów o większej intensywności promieniowania słonecznego. Po stwierdzeniu tego zjawiska, zastosowano dodatkową osłonę chroniącą przed słońcem. A przy analizie wykorzystano również wartości temperatury zewnętrznej zakupionej w serwisie openweather.org. Zakupione zostały dane dla Pleszewa z godzinowa rozdzielczością. Na wykresach oznaczona jest jako t zewn. (meteo). Pamiętając o tym, że pomiar temperatury ma bardzo lokalny charakter stwierdza się dobrą zgodność zarejestrowanych wartości temperatur i wartości wg zakupionych danych. Rozbieżności pomagają jedynie zidentyfikować błąd wynikający z wpływu działania promieni słonecznych na urządzenia pomiarowe.

Pomiary temperatur wewnątrz obu sal dają wartości do siebie zbliżone. W obu salach temperatura nigdy nie spadła poniżej wymaganej temperatury minimalnej (18°C), co oznacza, że system ogrzewania pracował z wystarczającą wydajnością. W okresie o niskiej intensywności oddziaływania słońca (okres zachmurzony) nie można wyróżnić znacznej różnicy pomiędzy utrzymaniem temperatury wewnątrz badanych sal. W okresie, gdy oddziaływanie promieniowania słonecznego było intensywniejsze (okresy bezchmurne) zauważalny jest wzrost temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń. Pojawia się tu tzw. „efekt szklarni" Promienie słoneczne docierające przez przegrody przezroczyste nagrzewają powierzchnie na które bezpośrednio padają, te z kolei oddają ciepło do powietrza w środku pomieszczenia w wyniku czego temperatura powietrza wzrasta. W sali

wyposażonej w system Respireco efekt ten jest bardziej widoczny (patrz rysunki 19 i 22). Wzrost temperatury wewnętrznej (maksymalnie do 22 °C). Można to tłumaczyć tym, że mieszanie powietrza wewnątrz sali z systemem Respireco sprawia, że ciepło z energii promieniowania słonecznego zmagazynowane w pomieszczeniu jest intensywniej przekazywane do powietrza, co przekłada się na wzrost temperatury.

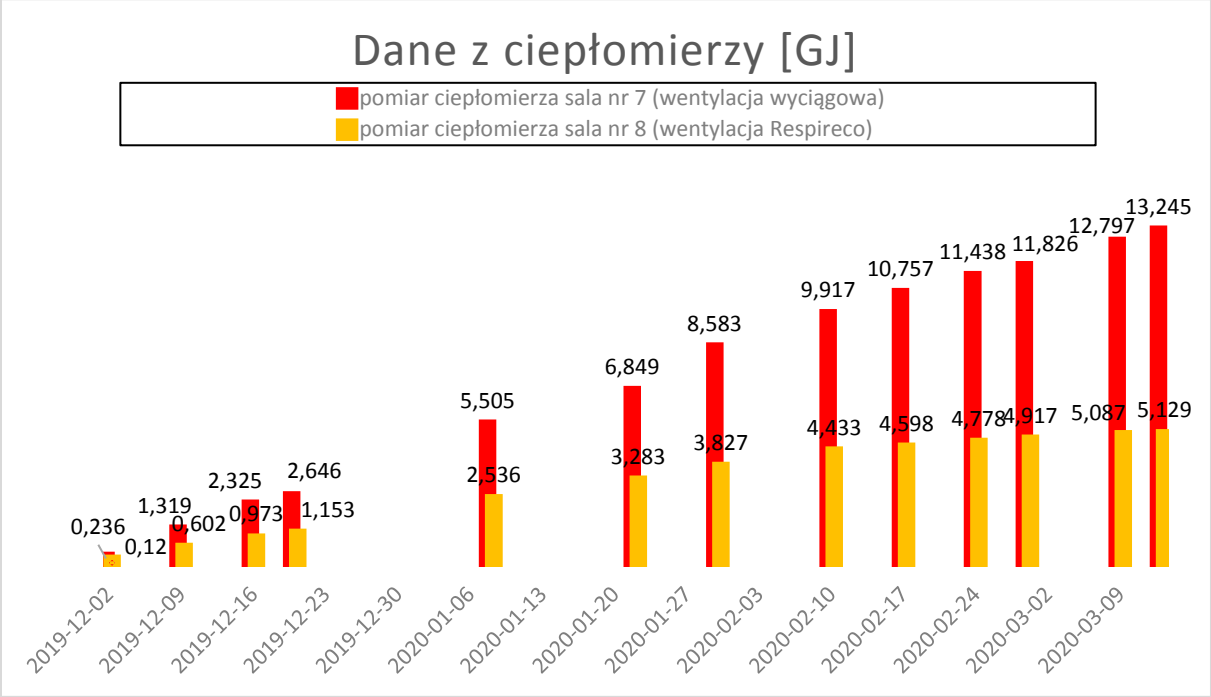
Pomiary ciepłomierzy

W tabeli 8 przedstawione są kolejne odczyty z ciepłomierzy (wartości zsumowane dla poszczególnych sal) wraz z wyznaczonymi różnicami pomiarów oraz wyznaczoną procentowo względną oszczędnością zużycia ciepła na cele grzewcze wg zależności

$$\textit{względna oszczędność} = \frac{(\textit{wskazanie z sali nr } 7 - \textit{ wskazanie z sali nr } 8)}{\textit{wskazanie z sali nr } 7} \cdot 100\%$$

Tabela 8. Odczyty ciepłomierzy

Data	Pomiar ciepłomierza **[GJ]**		Różnica wskazań **[GJ]**	Względna oszczędność ciepła stosowania Respireco **[%]**
	Sala nr 7 (mechaniczna wentylacja wyciągowa)	Sala nr 8 (Respireco)		
2019-12-02	0,236	0,12	0,116	49
2019-12-09	1,319	0,602	0,717	54
2019-12-16	2,325	0,973	1,352	58
2019-12-20	2,646	1,153	1,493	56
2020-01-08	5,505	2,536	2,969	54
2020-01-22	6,849	3,283	3,566	52
2020-01-30	8,583	3,827	4,756	55
2020-02-10	9,917	4,433	5,484	55
2020-02-17	10,757	4,598	6,159	57
2020-02-24	11,438	4,778	6,66	58
2020-02-29	11,826	4,917	6,909	58
2020-03-09	12,797	5,087	7,71	60
2020-03-13	13,245	5,129	8,116	61
			Całkowita oszczędność	**61**



Rysunek 23. Odnotowane wartości rejestru ciepłomierzy zainstalowanych w obu badanych salach (z systemem wentylacji Respireco i systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej) w okresie 2 grudnia 2019 - 9 marca 2020

Zużycie ciepła na ogrzewanie Sali z systemem wentylacji Respireco w analizowanym okresie było względnie o **61 %** niższe.

W przeliczeniu na poszczególne dni pomiędzy kolejnymi odczytami wyznaczono, że dla sali z systemem wentylacji *Respireco* średnie dzienne zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczenia wynosi **48,387 MJ/dzień**. Dla Sali z mechaniczną wentylacją wyciągową, analogicznie wyznaczone średnie dzienne zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania wynosi **124,953 MJ/dzień**. Porównując te dwie wartości względna średnia dzienna oszczędność wynosi **63,5 %**.

Efektywność odzysku ciepła

W oparciu o pomiary temperatury z czujników umieszczonych wewnątrz central Respireco (przed i za wymiennikiem) oraz wewnątrz badanego pomieszczenia Wyznaczono temperaturową efektywność odzysku ciepła. Zastosowano standardowe podejście i posłużono się zależnością:

$$\eta_{\theta,su} = \frac{\theta_{22} - \theta_{21}}{\theta_{11} - \theta_{21}} \cdot \frac{q_{m22}}{q_{m11}}$$

gdzie

θ_{22} - temperatura powietrza wlatującego do pomieszczenia (w czasie dostarczania)

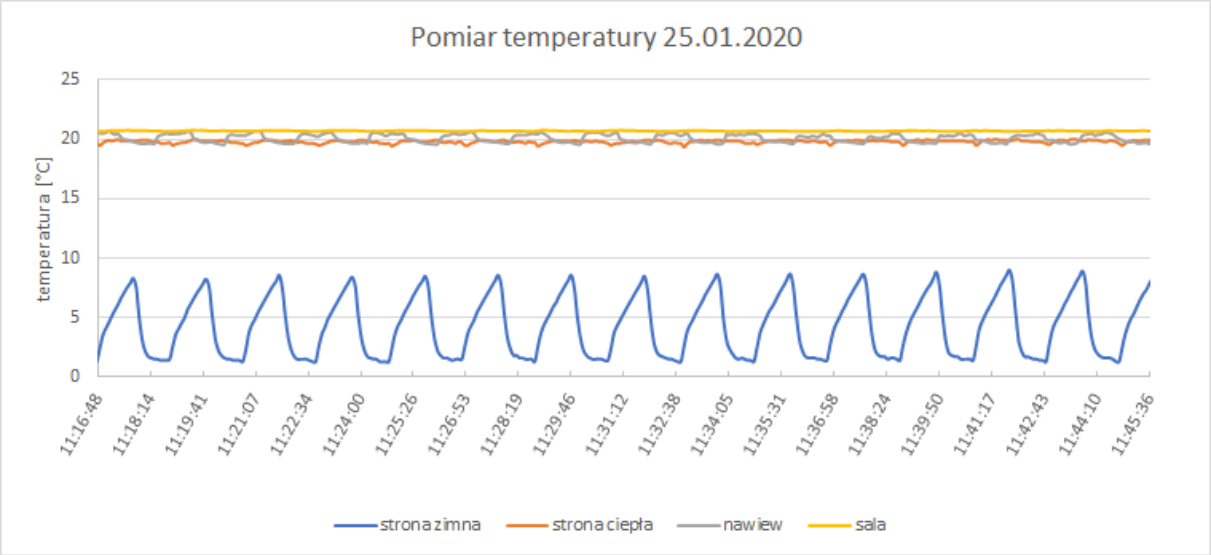
θ_{21} - temperatura powietrza przed wymiennikiem (w trakcie dostarczania)

θ_{11} - temperatura powietrza wewnątrz (w trakcie usuwania)

q_{m23} – strumień masowy powietrza dostarczanego

q_{m11} – strumień masowy powietrza usuwanego

W cały badanym okresie uzyskano wysoką sprawność odzysku ciepła na poziomie 90% - 95%. Na rysunku 24 przedstawiony jest przebieg temperatur w obrębie centrali wentylacyjnej Respireco dla wybranego okresu. Wyznaczona średnia efektywność temperaturowa odzysku ciepła dla przykładowego dnia 25 stycznia 2020, w którym zarejestrowano temperaturę powietrza zewnętrznego na poziomie 0°C jednej z niższych odnotowanych w okresie prowadzenia badań. Temperaturowa efektywność odzysku ciepła dla tego dnia wyniosła średnio 94%.



Rysunek 24. Przebieg temperatur dla Centrali Respireco 25 stycznia 2020

Ocena systemu wentylacji Respireco

System wentylacji rewersyjnej z regeneracyjnym odzyskiem ciepła (Zgłoszenie Patentowe P.426578) ***Respireco*** zainstalowany w dydaktycznej sali nr 8 w Szkole Podstawowej nr 2, w Pleszewie (woj. wielkopolskie) został poddany badaniom terenowym w celu oceny jego funkcjonowania w warunkach rzeczywistych. Głównym założeniem badań było poprawienie jakości powietrza wewnątrz pomieszczenia w którym dzieci odbywają naukę poprzez zapewnienie skutecznej wentylacji i utrzymanie parametrów powietrza wewnętrznego spełniającego warunki komfortu termicznego z uwzględnieniem wymagań stawianych placówkom edukacyjnym (utrzymanie temperatury wewnątrz pomieszczenia powyżej 18 °C, oraz zawartości dwutlenku węgla poniżej 1000 ppm).

System wentylacji Respireco został zaprojektowany jako systemem wentylacji bezkanałowej, tzn. że jego zainstalowanie nie wymaga prowadzenia kanałów wentylacyjnych. Jego zainstalowanie wymaga jedynie wykonania otworu w zewnętrznej ścianie budynku, bądź wykorzystaniu otworu okiennego w celu przełożenia wpustów czerpnio-wyrzutni. Taki sposób montażu czyni z *Respireco* system wentylacji łatwy i szybki w montażu względem alternatywnych dostępnych rozwiązań wentylacji nawiewno-wyciągowej. System wentylacji *Respireco* może służyć jako system wentylacji miejscowej (wentylacja pojedynczego pomieszczenia) lub wentylacji ogólnej (wymaga zainstalowania kilku jednostek Respireco w całym budynku). System Respireco można zainstalować również w systemie jednokanałowym (wymaga poprowadzenia jednego kanału do pomieszczeni). Wtedy centrala wentylacyjna umieszczona może być na poddaszu, a powietrze z zewnątrz do centrali i od centrali do pomieszczenia transportowane jest przez ten sam, pojedynczy kanał wentylacyjny. Właśnie takie rozwiązanie zastosowano w analizowanym rozwiązaniu.

Działanie systemu wentylacji *Respireco* opiera się na okresowym, skoordynowanym przełączaniu pracy jednostek – central wentylacyjnych pomiędzy trybami nawiewu świeżego powietrza z zewnątrz i wywiewu zużytego powietrza z wnętrza pomieszczenia. Zmiana kierunku przepływu powietrza następuje w czasie do 3 sekund. W badanym przypadku, system wentylacji *Respireco* zawierał dwie prototypowe jednostki Respireco 1000, które pracowały z przesunięciem fazy działania o 0,5 okresu pracy. Gdy jedna jednostka pracowała w trybie nawiewu (dostarczając świeże powietrze do pomieszczenia), druga pracowała w trybie wywiewu (usuwając zużyte powietrze z pomieszczenia), a przełączenie funkcji nawiew/wywiew obu jednostek następował w tej samej chwili. Dzięki takiemu rozwiązaniu zapewniono ciągłość wymiany powietrza wewnątrz pomieszczenia. Pełny cykl pracy wynosił 120 sekund (dla jednostek: 60 sekund w funkcji nawiewu i 60 sekund w funkcji wywiewu). Jednostki Respireco wykorzystując kanały wentylacji grawitacyjnej połączono z terminalami nawiewno-wywiewnymi zainstalowanymi wewnątrz pomieszczenia (dla każdej jednostki osobny terminal w miejsce kratek wentylacji grawitacyjnej.

Jednostki wentylacyjne Respireco wyposażone są w regeneracyjny wymiennik ciepła, zapewniający odzysk ciepła na poziomie przewyższającym 90% (w odniesieniu do temperaturowego współczynnika efektywności odzysku ciepła). Cechą wyróżniającą zastosowany regenerator jest brak kondensacji wilgoci w trakcie pracy urządzenia. Dzięki temu nie ma potrzeby odprowadzania skroplin z urządzenia, a w warunkach zimowych nie dochodzi do oszronienia, co eliminuje konieczność stosowania nagrzewnicy powietrza świeżego lub innych procedur ochrony przed zamarzaniem, ograniczających wydajność bądź efektywność energetyczną urządzenia. Sekcje filtracyjne zainstalowane po obu stronach montażowych jednostek Respireco zapewniają filtrację zarówno powietrza dostarczanego jak i usuwanego z pomieszczenia w taki sposób, że nie dochodzi do

przenoszenia zanieczyszczań z powietrza usuwanego do powietrza nawiewanego do pomieszczenia (oddzielne sekcje filtracyjne).

W badaniach terenowych w celu oceny systemu wentylacji mechanicznej *Respireco* porównano go z systemem wyciągowej wentylacji mechanicznej. System porównawczy zainstalowany jest w tym samym budynku, w którym zainstalowano system *Respireco* w pomieszczeniu identycznym co do wymiarów, usytuowania i eksploatacji. Porównanie systemu wentylacji *Respireco* z systemem wentylacji wywiewnej, w którym dostarczenie świeżego powietrza kompensują nawietrzniki wynikało z faktu, że instalacja grawitacyjna, w którą wyposażony był badany budynek nie spełniała podstawowego założenia badania tj. zapewnienia niskiego poziomu stężenia CO_2 wewnątrz pomieszczeń. We wstępnych pomiarach stwierdzono, że dla pomieszczeń z wentylacją grawitacyjną w trakcie zajęć stężenia CO_2 wzrasta znacznie ponad 1000 ppm (rejestrowano wartości ponad 4000 ppm). Zdecydowano się na zmodyfikowanie pierwotnego systemu wentylacji grawitacyjnej zastępując go wentylacją wywiewną. Wykorzystano istniejące kanały wentylacji grawitacyjnej do której połączono centralę z wentylatorem wyciągowym połączone z wyrzutnią dachową. Z technicznego punktu widzenia taki montaż wentylacji wywiewnej wymagał podobnego zaangażowania (porównywalnych nakładów) jak instalacja systemu wentylacji Respireco, co można traktować jako jeden z aspektów porównania.

Instalacja obu systemów (urządzeń wentylacyjnych Respireco w sali nr 8 oraz wentylatora wyciągowego w sali nr 7) nastąpiła w sierpniu 2019 r. W pierwszym tygodniu września 2019 rozpoczęto ich eksploatację w celu dopasowania parametrów powietrza w obu klasach. 30 listopada 2019 rozpoczęto rejestrację zużycia energii na ogrzewanie i wentylacje w obu klasach, a od 18 stycznia 2020 pełną rejestrację parametrów powietrza w obu badanych pomieszczeniach i na zewnątrz budynku. 13 marca 2020 z powodu covid19 (zamkniecie szkoły) budynek przestał być normalnie użytkowany co przełożyło się na skrócenie okresu badań.

Analizując okres badań: zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania wentylowanych pomieszczeń – 30 listopada 2019 – 13 marca 2020, parametry powietrza – 18 stycznia 2020 – 13 marca 2020 wysunięto szereg wniosków.

System wentylacji *Respireco* dzięki filtracji powietrza świeżego zapewnia zachowanie niskiego stężenia pyłów zawieszonych PM2.5 w wentylowanym pomieszczeniu przez co znacznie poprawia jego jakość. Stopień filtracji powietrza świeżego w odniesieniu do pyłów zawieszonych PM2.5 wyniósł **71,3%** względem poziomu zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego. W odniesieniu do sali z wentylacją mechaniczną bez filtracji, stężenie pyłów zawieszonych PM2.5 w Sali wyposażonej w wentylację *Respireco* było średnio **50,7%** niższe.

Stosowanie systemu wentylacji Respireco zapewniło równomierny rozkład temperatury w całym pomieszczeniu. Ciągłe dostarczanie świeżego powietrza i mieszanie go z powietrzem wewnętrznym zapewnia utrzymanie stężenia dwutlenku węgla na niskim poziomie. Dzięki ciągłej zmianie kierunku przepływu powietrza (wentylacja rewersyjna) system wentylacji *Respireco* cały czas intensywnie miesza powietrze w pomieszczeniu dzięki czemu rozrzedzenie zanieczyszczeń takich jak np. CO_2 jest równomierne dla całej objętości pomieszczenia, nie wywołując przy tym uczucia przeciągu.

Porównując do siebie dwa układy wentylacji, które zapewnią komfortowe warunki i wysoką jakość powietrza wewnętrznego (temperatura na poziomie 20 °C i stężenie CO_2 poniżej 1000 ppm), dzięki odzyskowi ciepła zapotrzebowanie na ogrzewanie sali z systemem wentylacji *Respireco* było o **61 %** niższe względem wentylacji bez odzysku ciepła.

System Respireco cechuje się wysoką efektywnością odzysku ciepła bez względu na warunki atmosferyczne. W badanym okresie, obejmującym również dni i noce ze spadkami temperatur poniżej zera, temperaturowa efektywność odzysku ciepła utrzymywała się na poziomie **90- 95%**.

Zasadnicze badania systemu wentylacji *Respireco* zostały przerwane 13 marca 2020. Związane było to z decyzją zamknięcia szkół ze względu na epidemię Covid 19. Na dzień pisania raportu nie ma oficjalnej decyzji odnośnie ponownego uruchomienia nauczania stacjonarnego w szkołach po przerwie wakacyjnej 2020. Zaistniała sytuacja związana z rozprzestrzenianiem się wirusa SARS-CoV-2 w 2020 roku pozwala zwrócić większą uwagę na jakość powietrza wewnętrznego w budynkach użyteczności publicznej, w szczególności takich jak szkoły. Aby ograniczyć stopień zanieczyszczeń rozprzestrzeniających się w powietrzu wewnętrznym, w tym wirusów należy skutecznie wentylować pomieszczenia i filtrować powietrze wewnętrzne. Zwracają na to uwagę różne zalecenia i raporty dotyczące przygotowywania budynków użyteczności publicznej (w tym placówek edukacyjnych) na ponowne otwarcie do pracy w normalnym trybie. W odniesieniu do wentylacji pomieszczeń główny nacisk stawiany jest na zwiększenie stopnia wentylacji pomieszczeń w celu rozrzedzenia stężenia wirusów potencjalnie obecnych w powietrzu [5].

W szkołach bardzo ważne jest zapewnienie dzieciom odpowiednich warunków do nauki i rozwoju. W odniesieniu do komfortu przebywania wewnątrz pomieszczeń najważniejszym czynnikiem branym pod uwagę jest temperatura wewnątrz pomieszczenia. Należy również zwrócić uwagę na równomierny jej rozkład. Kolejnym istotnym parametrem jest stężenie dwutlenku węgla. Zbyt wysoki poziom wpływa na złe samopoczucie oraz pogorszenie koncentracji osób znajdujących się wewnątrz pomieszczeń. W celu utrzymania poziomu stężenia dwutlenku węgla na odpowiednio niskim poziomie niezbędna jest skuteczna wentylacja. Systemy wentylacji grawitacyjnej nie są w stanie zagwarantować wymiany powietrza na wymaganym poziomie. Wietrzenie sal lekcyjnych często jest zaniedbywane. Można stwierdzić, że jedynym sposobem zagwarantowania odpowiednio niskiego stężenia dwutlenku węgla w sali lekcyjnej jest zastosowanie systemu wentylacji mechanicznej, która będzie pracować autonomicznie. Wentylacja mechaniczna zapewnia dostarczenie odpowiedniej ilości świeżego powietrza i jest gwarancją utrzymania niskiego poziomu stężenia dwutlenku węgla wewnątrz pomieszczeń. Stosowanie klasycznych systemów wentylacji nawiewno-wywiewnej wiąże się z koniecznością rozprowadzenia wewnątrz budynku sieci kanałów wentylacyjnych, co w przypadku adaptacji istniejących budynków jest zadaniem technicznie trudnym i czasochłonnym, a wyposażenia w taki system budynku jakim jest szkoła wiąże się z wysokimi kosztami. Zastosowanie mechanicznej wentylacji wywiewnej np. poprzez adaptację kanałów wentylacji grawitacyjnej jest rozwiązaniem znacznie prostszym i taki system jest już w stanie zapewnić wyższą jakość powietrza wewnętrznego w odniesieniu do poziomu stężenia CO_2, niestety ze względu na brak odzysku ciepła rozwiązanie to będzie się wiązało ze wzrostem zapotrzebowania na ciepło w okresie zimowym, co przełoży się na wzrost kosztów eksploatacji budynku. System wentylacji Respireco jest rozwiązaniem stosunkowo łatwym do montażu. Nowatorskie rozwiązania zastosowane w systemie wentylacji Respireco pozwalają osiągnąć korzyści mechanicznej wentylacji nawiewno-wywiewnej (regulacja wydatku wentylowanego powietrza, dobre wymieszanie powietrza wewnątrz pomieszczenia, odzysk ciepła z powietrza usuwanego). Jednocześnie system wentylacji Respireco cechuje się duża prostotą i łatwością montażu. W przypadku budynków z dużą ilością pomieszczeń system może być instalowany stopniowo – indywidualnie do każdego pomieszczenia. Montaż systemu Respireco jako miejscowego systemu wentylacji (do jednego pomieszczenia), pozwala na pewne izolowanie od siebie wentylowanych pomieszczeń i zapobiegnie przenoszeniu się skażenia pomiędzy pomieszczeniami. Dzięki wysokoefektywnemu odzyskowi ciepła zapewnia efektywną wentylację pomieszczeń nie powodując przy tym znacznego wzrostu zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania.

Lliteratura

[1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowani Dz.U.2019.0.1065 t.j.

[2] PN-B-03430:1983/Az3:2000 Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania.

[3] Ryńska Joanna, Wentylacja budynków edukacyjnych - problemy z jakością powietrza wewnętrznego, „Rynek Instalacyjny" nr 9/2019, s. 52-56.

[4] Ludwiczak, A. Ratajczak, K. Wentylacja placówek dydaktyczno-edukacyjnych. Przegląd wybranych polskich i zagranicznych wymagań dotyczących strumienia powietrza i stężenia Co2, „Rynek Instalacyjny" nr 3/2018, s. 24-29.

[5] ASHRAE EPIDEMIC TASK FORCE SCHOOLS & UNIVERSITIES | Updated 7-15-2020, https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/reopening-schools-and-universities-c19-guidance.pdf [dostęp 24.07.2020]