

dr hab. inż. Wojciech Drozd, prof. PK^{1)*}

ORCID: 0000-0001-7978-2268

dr hab. inż. Grzegorz Ginda, prof.

AGH²⁾

ORCID: 0000-0003-2153-1858

dr inż. Marcin Kowalik³⁾

ORCID: 0000-0001-9679-8835

Model-based analysis of air purifier location in office rooms using multipoint PM measurement

Modelowa analiza lokalizacji oczyszczaczy powietrza w pomieszczeniach biurowych z użyciem wielopunktowego pomiaru PM

DOI: 10.15199/33.2026.09.15

Abstract. This paper presents a model-based analysis of air purifier location in office rooms using multipoint PM measurement and Smart Building integration. The methodology included the collocation and normalisation procedure for LookO2 V4 sensors, a nine-point measurement layout and a simplified model of concentration decay after a pollution pulse. The model included room volume, the location of windows and doors, thermal stratification, local mixing differences and three air-purifier location variants. A preliminary point validation was also carried out for one reference room and three device locations by comparing PM2.5 profiles with model values. The model-based results indicate that the choice of location may change T95 by several dozen percent. The model is simplified and does not replace complete in-situ analyses, but it provides a basis for designing full-scale measurements and sensitivity analysis of the system.

Keywords: air purifier; PM2.5; Clean Air Delivery Rate; indoor air quality; energy efficiency.

Streszczenie. W artykule przedstawiono modelową analizę lokalizacji oczyszczaczy powietrza w pomieszczeniach biurowych z wykorzystaniem wielopunktowego pomiaru PM oraz integracji Smart Building. Metodyka obejmowała procedurę kolokacji i normalizacji czujników LookO2 V4, dziewięciopunktowy układ pomiarowy oraz uproszczony model zaniku stężenia po impulsie zanieczyszczenia. W modelu uwzględniono kubaturę, położenie okien i drzwi, stratyfikację termiczną, lokalne różnice mieszania oraz trzy warianty lokalizacji oczyszczacza. Przeprowadzono również wstępną walidację punktową w przypadku jednego pomieszczenia referencyjnego i trzech lokalizacji urządzenia, porównując przebieg PM2.5 z wartościami modelowymi. Wyniki badań modelowych wskazują, że dobór lokalizacji może zmieniać czas T95 o kilkanaście do kilkudziesięciu procent. Model ma charakter uproszczony i nie zastępuje pełnych analiz in situ, ale stanowi podstawę projektowania badań właściwych oraz analizy wrażliwości układu.

Słowa kluczowe: oczyszczacz powietrza; PM2.5; efektywny strumień czystego powietrza; jakość powietrza wewnętrznego; efektywność energetyczna.

Indoor air quality is a key issue in the operation of residential, office and public buildings. Sources of airborne particulate matter include both pollutants entering from outdoors and indoor emissions associated with occupant movement, opening windows and doors, equipment operation, textiles, dust, the use of kitchens or corridors, and particle resuspension. The PM2.5 fraction is particularly important because fine particles remain airborne for long periods, readily disperse throughout a room and are relevant to health-risk assessment. Air pollution remains one of the major environmental health risk factors, as emphasised by the 2021 WHO guidelines [1].

In occupied buildings, indoor air quality is generally improved through ventilation, central filtration, portable air purifiers, or a combination of these approaches. Portable purifiers are advantageous because they require no alterations

Jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń jest jednym z istotnych zagadnień eksploatacji budynków mieszkalnych, biurowych i użyteczności publicznej. Źródłem pyłów zawieszonych są zarówno zanieczyszczenia napływające z zewnątrz, jak i emisja wewnętrzna: przemieszczanie się użytkowników; otwieranie okien i drzwi; praca urządzeń; tekstylia; kurz; eksploatacja kuchni lub korytarzy oraz wtórne unoszenie cząstek. Szczególne znaczenie ma frakcja PM2.5, ponieważ drobne cząstki wykazują długi czas przebywania w powietrzu, łatwo rozprzestrzeniają się w pomieszczeniu oraz są istotne z punktu widzenia oceny ryzyka zdrowotnego. Zanieczyszczenie powietrza pozostaje jednym z ważniejszych środowiskowych czynników ryzyka zdrowotnego, co podkreślają wytyczne WHO z 2021 r. [1].

W warunkach eksploatacyjnych poprawa jakości powietrza jest realizowana zwykle przez wentylację, filtrację centralną, oczyszczacze przenośne albo w wyniku połączenia tych rozwiązań. Oczyszczacze przenośne są korzystne, ponieważ nie wymagają ingerencji w instalację budynku, mogą być relokowane i współpracować z lokalnymi czujnikami jakości powietrza. Ich skuteczność zależy od katalogowej wydajności CADR (Clean Air Delivery Rate) – efektywnego strumienia powietrza

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; Wydział Zarządzania

³⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

^{*}) Correspondence address: wojciech.drozd@pk.edu.pl

to building services, can be relocated and can operate in conjunction with local air-quality sensors. Their performance depends on the rated clean air delivery rate (CADR), the actual mixing of air, the location of the device relative to the pollution source, furniture arrangement, room geometry, thermal stratification and fan operating mode. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) notes that room air cleaners should be positioned so that furniture or curtains do not obstruct their inlets and outlets, and so that their airflow does not create an adverse flow path from one person to another [2].

This paper discusses a pilot assessment of a research system comprising purifiers P1/P2 (P1 parameters: CADR 216 m³/h, maximum power consumption 25 W, rooms up to approximately 26 m²; P2 parameters: CADR 306 m³/h, power consumption 54/17/5 W, rooms up to approximately 38 m²), a network of PM1/2.5/10 sensors (optical particulate-matter sensors using laser light scattering to record PM1, PM2.5 and PM10), and Home Assistant/HomeKit integration. The methodology specified nine measurement points: eight sensors at room corners, at heights of 0.5 and 2.0 m, and one central sensor at a height of 1.2 – 1.25 m. Three locations of a single purifier were evaluated. The key indicators were T90 [min] and T95 [min] energy consumed to reach the threshold, spatial uniformity, and vertical differences between the measurement layers.

The study provided preliminary information on system operation and data for a pilot test matrix that may support the design of the main study. These data formed the basis for testing a computational research model based on a single-point concentration-decay equation and spatial correction factors consistent with the physics of airflow in typical office rooms.

The proposed model is simplified and does not replace comprehensive computational fluid dynamics (CFD) analyses or in situ measurements. Local turbulence and the effects of occupants, heat sources, room furnishings and mechanical ventilation were represented in a simplified manner using correction factors. The results should be regarded as a basis for designing the main study, undertaking a preliminary assessment of system sensitivity, and selecting configurations that require further measurement-based validation.

Assumptions and objective of the analysis

The objective was to develop a methodology for investigating the effect of air-purifier location on the time required to reduce PM2.5 concentrations and on electricity consumption in typical office rooms. The analysis examined whether purifier location can be treated as a design variable in Smart Building systems rather than solely as an intuitive user decision.

The following assumptions were adopted: the location of the purifier relative to particulate ingress sources, windows, doors, corners and the longitudinal room axis substantially affects T90/T95 [min] and the energy required to achieve the target PM2.5 level; and a network of nine PM sensors can

oraz rzeczywistego mieszania powietrza, lokalizacji urządzenia względem źródła zanieczyszczenia, układu mebli, geometrii pomieszczenia, stratyfikacji termicznej oraz trybu pracy wentylatora. Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji – ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) zwraca uwagę, że urządzenia pokojowe powinny być ustawiane tak, aby wlot i wylot powietrza nie były ograniczone przez meble lub zasłony, a strumień powietrza nie powodował niekorzystnego nawiewu z jednej osoby na drugą [2].

W artykule omówiono badania pilotażowe oceny układu badawczego obejmującego oczyszczacze P1/P2 (parametry oczyszczacza P1: CADR 216 m³/h, moc maksymalna 25 W; pomieszczenie do ok. 26 m²; parametry oczyszczacza P2: CADR 306 m³/h; moc 54/17/5 W, pomieszczenie do ok. 38 m²), sieć czujników PM1/2.5/10 (optyczny czujnik pyłu zawieszonego wykorzystujący metodę rozpraszania światła laserowego, rejestruje PM1, PM2.5 i PM10) oraz integrację Home Assistant/HomeKit. Zgodnie z założeniami przyjęto dziewięć punktów pomiarowych: osiem czujników w narożach pomieszczenia na wysokości 0,5 i 2,0 m oraz jeden czujnik centralny na wysokości 1,2 – 1,25 m. Ocenie poddano trzy warianty lokalizacji pojedynczego oczyszczacza, a jako kluczowe wskaźniki przyjęto czas T90 [min] i T95 [min], energię zużytą do osiągnięcia progu, jednorodność przestrzenną oraz różnice pionowe między warstwami pomiarowymi.

Badania pozwoliły zebrać wstępne informacje o funkcjonowaniu systemu oraz przygotować dane do pilotażowej matrycy badań, która może być pomocne przy określeniu badań właściwych. Dane potraktowano jako podstawę testowania obliczeniowego modelu badawczego, bazującego na jednopunktowym równaniu zaniku stężenia i korektach przestrzennych zgodnych z fizyką przepływu powietrza w typowych pomieszczeniach biurowych.

Przedstawiony model ma charakter uproszczony i nie zastępuje pełnych analiz CFD ani pomiarów in situ. Lokalne turbulencje, wpływ użytkowników, źródeł ciepła, wyposażenia pomieszczeń oraz pracy wentylacji mechanicznej określono w sposób uproszczony za pomocą współczynników korekcyjnych. Uzyskane wyniki należy traktować jako podstawę do projektowania badań właściwych, wstępnej oceny wrażliwości układu oraz wyboru konfiguracji wymagających dalszej walidacji pomiarowej.

Założenia i cel analizy

Celem analizy było opracowanie metodyki badania wpływu lokalizacji oczyszczacza powietrza na czas redukcji stężenia PM2.5 oraz na zużycie energii elektrycznej w typowych pomieszczeniach biurowych. Podjęto próbę określenia, czy lokalizacja oczyszczacza może być traktowana jako zmienna projektowa w systemach Smart Building, a nie wyłącznie jako intuicyjna decyzja użytkownika.

Przyjęto następujące założenia: lokalizacja oczyszczacza względem źródeł napływu pyłu, okien, drzwi, naroży i osi długiej pomieszczenia istotnie wpływa na czas T90/T95 [min] oraz na energię potrzebną do osiągnięcia założonego poziomu PM2.5; sieć dziewięciu czujników PM umożliwia wykrycie różnic przestrzennych, których nie ujawniłby pojedynczy czuj-

detect spatial differences that would not be revealed by a single central sensor. Five research questions were formulated: (1) which purifier location minimises T95 in regular, elongated, and long, narrow rooms; (2) whether the operating setting providing the fastest air cleaning is also the most energy-efficient; (3) how strongly thermal stratification between the 0.5 and 2.0 m layers affects the results; (4) whether adaptive High–Medium operation provides a compromise between air-cleaning time and energy consumption; and (5) whether the modelled trend agrees with the PM2.5 control profiles for one reference room and three device locations.

Characteristics of the devices investigated

Two air-cleaning devices were adopted in the study (Figure 1): purifier P1 and purifier P2. For P1, the adopted air-cleaning capacity was 216 m³/h, the recommended room area was up to 26 m², and maximum power consumption was 25 W [3]. The corresponding values for P2 were 306 m³/h, 38 m², and 54/17/5 W in maximum/medium/low mode, respectively, with a noise level of 23 – 55 dB(A) [4]. In the calculations, CADR was treated as the effective clean-air flow rate, corrected for device location and mixing conditions. Device noise levels were considered in relation to workplace requirements. Under PN-N-01307: 1994, the permissible equivalent A-weighted sound level, referenced to an 8-hour working day or an average working week, is 85 dB; the maximum A-weighted sound level is 115 dB; and the peak C-weighted sound level is 135 dB [5]. The rated purifier noise levels are considerably below hearing-protection limits, although occupant acoustic comfort must also be considered in office rooms.

The measurement network was based on LookO2 V4 sensors incorporating the Plantower PMS5003 module (Figure 2). These devices measure PM1, PM2.5 and PM10, communicate via Wi-Fi and provide local data in JSON format, enabling integration with a local automation system [6]. The PMS5003 uses laser light scattering, distinguishes particle-size ranges of 0.3 – 1.0 µm, 1.0 – 2.5 µm and 2.5 – 10 µm, and has an effective PM2.5 mass-concentration range of 0 – 500 µg/m³ with a resolution of 1 µg/m³ [7]. The metrological distinction between particle size (µm) and mass concentration (µg/m³) is essential for correctly interpreting PMS5003 data (Table 1).

nik centralny. Sformułowano pięć pytań badawczych: (1) który wariant ustawienia oczyszczacza w pomieszczeniach regularnych, wydłużonych i podłużnych minimalizuje czas T95; (2) czy ustawienie pracy oczyszczacza w trybie najszybszym jest jednocześnie najbardziej energooszczędne; (3) jak duży wpływ na wyniki ma stratyfikacja termiczna między warstwą 0,5 i 2,0 m; (4) czy tryb adaptacyjny High-Medium może stanowić kompromis między czasem oczyszczania i zużyciem energii; (5) czy w przypadku jednego pomieszczenia referencyjnego i trzech lokalizacji urządzenia uzyskuje się zgodność trendu modelowego z przebiegami kontrolnymi PM2.5.

Charakterystyka badanych urządzeń

W badaniu przyjęto dwa urządzenia oczyszczające (rysunek 1): oczyszczacz P1 oraz oczyszczacz P2. W przypadku modelu P1 przyjęto wydajność oczyszczania 216 m³/h, zalecaną powierzchnię do 26 m² i maksymalny pobór mocy 25 W [3], a modelu P2 odpowiednio: 306 m³/h; 38 m²; moc max./med./low 54/17/5 W oraz poziom hałasu 23 – 55 dB (A) [4]. W obliczeniach traktowano wydajność CADR jako efektywny strumień czystego powietrza, korygowany o lokalizację urządzenia i warunki mieszania. Poziom hałasu urządzeń przyjęto w odniesieniu do wymagań środowiska pracy. Zgodnie z PN-N-01307:1994 dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy lub przeciętnego tygodnia pracy wynosi 85 dB, maksymalny poziom dźwięku A – 115 dB, a szczytowy poziom dźwięku C – 135 dB [5]. Zestawione wartości katalogowe oczyszczaczy są znacznie mniejsze od progów ochrony słuchu, ale w pomieszczeniach biurowych należy dodatkowo uwzględniać komfort akustyczny użytkowników.

Sieć pomiarowa bazowała na czujnikach LookO2 V4 z modułu Plantower PMS5003 (rysunek 2). Urządzenia określają PM1, PM2.5 i PM10, mają komunikację Wi-Fi oraz udostępniają lokalne dane w formacie JSON, co umożliwia integrację z lokalnym systemem automatyki [6]. Moduł PMS5003 wykorzystuje zasadę rozpraszania światła laserowego, rozróżnia przedziały wielkości cząstek 0,3 – 1,0 µm, 1,0 – 2,5 µm oraz 2,5 – 10 µm, a efektywny zakres masowego stężenia PM2.5 wynosi 0 – 500 µg/m³ z rozdzielczością 1 µg/m³ [7]. Należy podkreślić metrologiczną różnicę między wymiarem cząstek (µm) a ich stężeniem masowym (µg/m³), co jest kluczowe przy poprawnej interpretacji danych z modułu PMS5003 (tabela 1).

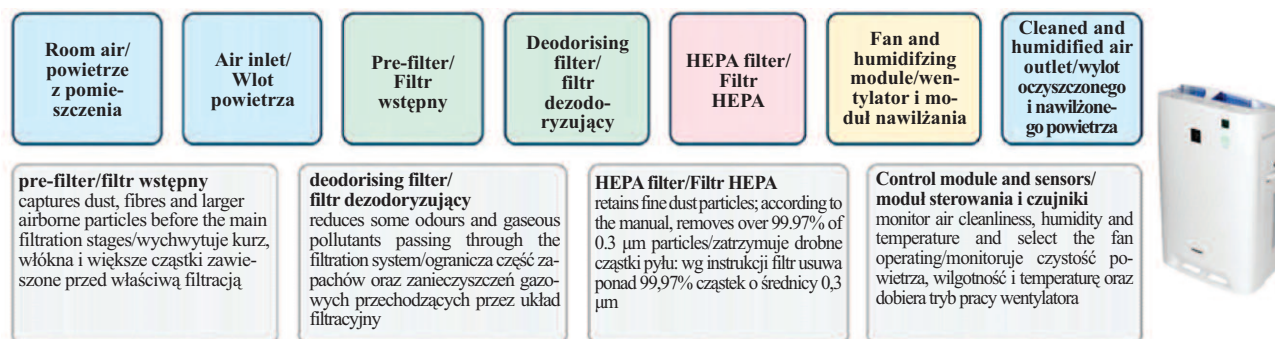


Fig. 1. Operating principle of air purifiers P1 and P2 and their appearance

Rys. 1. Schemat działania oczyszczaczy P1 i P2 oraz ich model

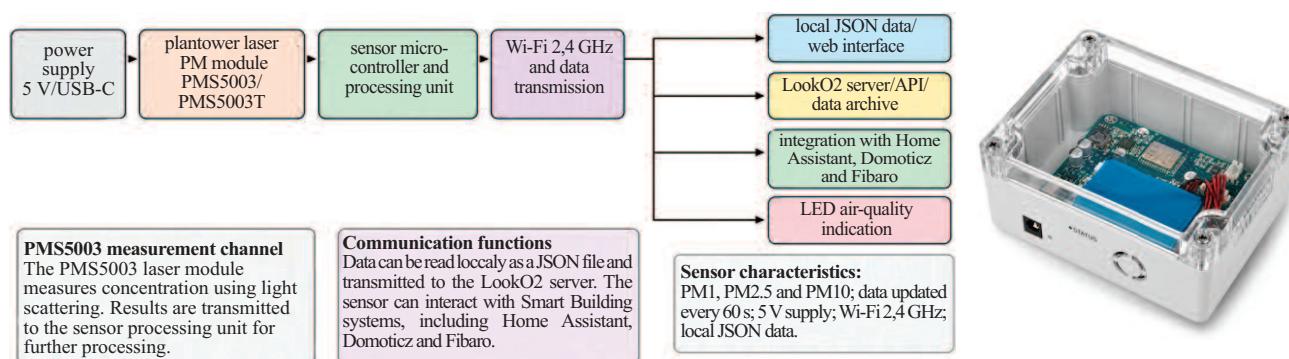


Fig. 2. Diagram of the LookO2 sensor operation and its appearance
Rys. 2. Schemat działania czujnika LookO2 oraz jego model

Table 1. Device parameters adopted as model input data

Tabela 1. Parametry urządzeń przyjęte jako dane wejściowe modelu

Device/component/ Urządzenie/element	Model input parameters/ Parametry przyjęte do modelu	Role in the study/Rola w badaniu	Source/ Źródło
LookO2 V4	PM1, PM2.5, PM10; Wi-Fi; JSON	nine-point network; Smart Building integration/sieć 9 punktów, integracja Smart Building	[6]
Plantower PMS5003	0.3-1.0; 1.0-2.5; 2.5-10 μm ; PM2.5: 0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM sensing module in LookO2 V4/moduł pomiarowy PM w LookO2 V4	[7]
Purifier P1/ Oczyszczacz P1	CADR 216 m^3/h ; max. 25 W; rooms up to approx. 26 m^2 / CADR 216 m^3/h ; max 25 W; pomieszczenia do ok. 26 m^2	small and medium-sized offices/male i średnie gabinety	[3]
Purifier P2/ Oczyszczacz P2	CADR 306 m^3/h ; 54/17/5 W; rooms up to approx. 38 m^2 / CADR 306 m^3/h ; 54/17/5 W; pomieszczenia do ok. 38 m^2	larger offices and small meeting rooms/większe biura i małe sale spotkań	[4]

PM sensor calibration and normalisation: mathematical formulation

The use of multiple low-cost optical sensors requires prior verification of their agreement. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) identifies collocation with a reference or regulatory instrument as a fundamental method for assessing data accuracy and deriving corrections to sensor readings [8]. In the present study, the calibration procedure comprised laboratory collocation, collocation at different PM2.5 levels, and normalisation before each test procedure.

The sensors were assigned identifiers L1-L4, H1-H4 and C. They were powered by identical 5 V power supplies, time-synchronised, and switched on at least 30 min before the actual measurement. During the initial collocation stage, all units are placed together at a height of 1.25 m, with 20 – 30 cm spacing between housings. Data are recorded under stable conditions for 60 – 120 min to identify outlying sensors and determine the initial offset in their readings.

The second stage comprised collocation over three PM2.5 concentration ranges: low, medium and high. The low range can be obtained by prior purifier operation and stabilisation, the medium range by a short aerosol pulse, and the high range by a controlled test pulse. Sources that are difficult to reproduce should be limited in the main study. A candle or incense may be used for qualitative tests, whereas a reproducible dose of test aerosol or a standardised emission scenario is preferable for comparative measurements. In practice, the full procedure requires collocation with a reference instrument, while the simplified procedure relies on relative normalisation to the sensor-network median. Relative

Kalibracja i normalizacja czujników PM oraz jej matematyczny zapis

Warunkiem wykorzystania wielu niskokosztowych czujników optycznych jest wcześniejsze sprawdzenie ich zgodności. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska EPA (*Environmental Protection Agency*) wskazuje, że kolokacja czujników z urządzeniem referencyjnym lub regulacyjnym jest podstawowym sposobem oceny dokładności danych oraz podstawą do wyznaczania korekt wskazań [8]. W przeprowadzonym badaniu procedura kalibracji obejmowała kolokację laboratoryjną, kolokację przy zróżnicowanych poziomach PM2.5 oraz normalizację przed każdą procedurą testową.

Czujniki zostały oznaczone identyfikatorami L1-L4, H1-H4 oraz C i były zasilane z identycznych zasilaczy 5 V, zsynchronizowane czasowo i uruchomione minimum 30 minut przed właściwym pomiarem. W etapie kolokacji zerowej wszystkie jednostki ustawia się w jednym punkcie, na wysokości 1,25 m, w odstępie między obudowami 20 – 30 cm. Rejestracja odbywa się w stabilnych warunkach i trwa 60 – 120 minut, aby wykryć tzw. czujniki odstające oraz obliczyć przesunięcie początkowe wskazań.

Drugi etap obejmował kolokację przy trzech zakresach stężenia PM2.5: niskim, średnim i wysokim. Zakres niski można uzyskać przez wcześniejszą pracę oczyszczacza i stabilizację, zakres średni przez krótki impuls aerozolu, a zakres wysoki przez kontrolowany impuls testowy. W badaniach właściwych należy ograniczyć źródła trudne do powtórzenia. Świeca lub kadzidło może być użyte do prób jakościowych, a w pomiarach porównawczych korzystniejsza jest powtarzalna dawka aerozolu testowego lub znormalizowany scenariusz emisji. W praktyce wariant pełny wymaga kolokacji czujników z urządzeniem referencyjnym, natomiast wariant uproszczony bazuje na nor-

normalisation must be clearly distinguished from metrological calibration.

The mathematical formulation of sensor calibration and normalisation is given in Equations (1) – (6). During collocation, each sensor is treated as a separate measurement channel for which a correction must be determined relative to a reference value or to the sensor-network median. Multivariate correction of PM sensor readings:

$$PM_{2,5,ref,i}(t) = a_i + b_i PM_{2,5,raw,i}(t) + c_i RH(t) + d_i T(t) + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

where:

$PM_{2,5,ref,i}(t)$ – reference value for sensor i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$PM_{2,5,raw,i}(t)$ – raw reading [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$RH(t)$ – relative humidity [%]; $T(t)$ – temperature [$^{\circ}\text{C}$];

a_i, b_i, c_i, d_i – correction coefficients [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], [-], [$\mu\text{g}/\text{m}^3/\%$], [$\mu\text{g}/\text{m}^3/^{\circ}\text{C}$];

$\varepsilon_i(t)$ – random term [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]; t – measurement time [min].

Relative normalisation to the sensor-network median:

$$PM_{2,5,norm,i}(t) = \alpha_i + \beta_i PM_{2,5,raw,i}(t) \quad (2)$$

where

$PM_{2,5,norm,i}(t)$ – PM2.5 concentration after relative normalisation for sensor i at time t [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$PM_{2,5,raw,i}(t)$ – raw PM2.5 concentration reading [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

α_i – intercept of the relative normalisation for sensor i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

β_i – slope coefficient of the relative normalisation [-];

i – sensor index [-];

t – measurement time [min].

Equation (2) is used when an independent reference instrument is not available in the pilot study. The coefficients α_i and β_i are determined by collocating all sensors at one location.

Concentration corrected for the background level before the pollution pulse:

$$\Delta C_i(t) = PM_{2,5,norm,i}(t) - C_{bg,i} \quad (3)$$

where:

$\Delta C_i(t)$ – excess PM2.5 concentration above the background level for sensor i at time t [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$C_{bg,i}$ – mean background value for sensor i , determined during the stabilisation period before the test [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

i – sensor index.

Mean systematic error relative to the reference sensor:

$$B_i = 1/n \sum_{j=1}^n (C_{i,j} - C_{ref,j}) \quad (4)$$

where:

B_i – mean systematic error of sensor i relative to the reference value [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

n – number of samples in the collocation series [-];

j – index of the successive measurement sample [-];

$C_{i,j}$ – concentration indicated by sensor i in sample j [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$C_{ref,j}$ – reference value in sample j [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

The value of B_i identifies sensors that overestimate or underestimate measurements over the entire test range. Root mean square error:

$$RMSE_i = \sqrt{1/n \sum_{j=1}^n (C_{i,j} - C_{ref,j})^2} \quad (5)$$

where:

$RMSE_i$ – a primary criterion for assessing the agreement of the sensor with the reference value [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Coefficient of determination for sensor collocation:

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (C_{i,j} - C_{ref,j})^2}{\sum_{j=1}^n (C_{ref,j} - \bar{C}_{ref})^2} \quad (6)$$

malizacji względnej do mediany sieci czujników. Należy jednoznacznie odróżnić normalizację względną od kalibracji metrologicznej.

Matematyczny zapis procedury kalibracji i normalizacji czujników przedstawiono w równaniach (1) – (6). W procedurze kolokacji każdy czujnik traktuje się jako oddzielny tor pomiarowy, w przypadku którego należy wyznaczyć poprawkę względem wartości referencyjnej albo względem mediany sieci czujników. Korekta wielowymiarowa wskazań czujnika PM:

$$PM_{2,5,ref,i}(t) = a_i + b_i PM_{2,5,raw,i}(t) + c_i RH(t) + d_i T(t) + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

gdzie:

$PM_{2,5,ref,i}(t)$ – wartość odniesienia i -tego czujnika [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$PM_{2,5,raw,i}(t)$ – odczyt surowy [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$RH(t)$ – wilgotność względna [%]; $T(t)$ – temperatura [$^{\circ}\text{C}$];

a_i, b_i, c_i, d_i – współczynniki korekcyjne [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], [-], [$\mu\text{g}/\text{m}^3/\%$], [$\mu\text{g}/\text{m}^3/^{\circ}\text{C}$];

$\varepsilon_i(t)$ – składnik losowy [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]; t – czas pomiaru [min].

Normalizacja względna do mediany sieci czujników:

$$PM_{2,5,norm,i}(t) = \alpha_i + \beta_i PM_{2,5,raw,i}(t) \quad (2)$$

gdzie:

$PM_{2,5,norm,i}(t)$ – stężenie PM2.5 po normalizacji względnej dla i -tego czujnika w chwili t [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$PM_{2,5,raw,i}(t)$ – surowy odczyt stężenia PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

α_i – wyraz wolny normalizacji względnej dla i -tego czujnika [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

β_i – współczynnik nachylenia normalizacji względnej [-];

i – indeks czujnika [-];

t – czas pomiaru [min].

Równanie (2) stosuje się wtedy, gdy w badaniu pilotażowym nie ma niezależnego urządzenia referencyjnego. Współczynniki α_i i β_i wyznacza się podczas kolokacji wszystkich czujników w jednym punkcie.

Stężenie skorygowane o poziom tła przed impulsem zanieczyszczenia:

$$\Delta C_i(t) = PM_{2,5,norm,i}(t) - C_{bg,i} \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta C_i(t)$ – nadwyżka stężenia PM2.5 względem poziomu tła i -tego czujnika w chwili t [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$C_{bg,i}$ – średnia wartość tła i -tego czujnika wyznaczona w okresie stabilizacji przed rozpoczęciem próby [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

i – indeks czujnika.

Średni błąd systematyczny względem czujnika referencyjnego:

$$B_i = 1/n \sum_{j=1}^n (C_{i,j} - C_{ref,j}) \quad (4)$$

gdzie:

B_i – średni błąd systematyczny i -tego czujnika względem wartości referencyjnej [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

n – liczba próbek w serii kolokacyjnej [-];

j – indeks kolejnej próbki pomiarowej [-];

$C_{i,j}$ – wartość stężenia wskazana przez i -ty czujnik w j -tej próbce [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$C_{ref,j}$ – wartość referencyjna w j -tej próbce [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Wartość B_i pozwala wykryć czujniki zawyżające lub zaniżające pomiar w całym zakresie próby – pierwiastek błędu średniokwadratowego:

$$RMSE_i = \sqrt{1/n \sum_{j=1}^n (C_{i,j} - C_{ref,j})^2} \quad (5)$$

gdzie:

$RMSE_i$ – podstawowe kryterium oceny jakości dopasowania czujnika do wartości referencyjnej [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Współczynnik determinacji w przypadku kolokacji czujnika:

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (C_{i,j} - C_{ref,j})^2}{\sum_{j=1}^n (C_{ref,j} - \bar{C}_{ref})^2} \quad (6)$$

where:

n – number of samples in the collocation series [-];
 j – index of the successive measurement sample [-];
 $C_{i,j}$ – concentration indicated by sensor i in sample j [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 $C_{\text{ref},j}$ – reference value in sample j [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 $\bar{C}_{\text{ref}}$ – mean reference value over the series [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 B_i – mean systematic error of sensor i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 RMSE_i – root mean square error [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 R_i^2 – coefficient of determination [-].

A sensor was accepted for analysis only if it simultaneously exhibited low bias, low RMSE, high R^2 and no excessive drift after the measurement series. The acceptance criteria were a mean error relative to the reference not exceeding 3 – 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the low and medium ranges, R^2 above 0.85, missing data below 5% of the test, and post-series drift below 10% relative to the network median. Sensors failing these conditions were excluded from the analysis or assigned a separate correction factor.

Research layout and placement variants

Nine measurement points were adopted in each room. Four sensors, L1-L4, were placed at the corners at a height of 0.5 m, four sensors, H1-H4, at the same corners at a height of 2.0 m, and sensor C at the room centre at a height of 1.25 m. This arrangement enables simultaneous assessment of horizontal and vertical gradients and the representativeness of the central point. The minimum sensor-to-wall distance should be 0.5 m unless room geometry prevents this.

The use of nine sensors was justified by the need to determine a simplified zonal map of the room rather than a single representative value. The lower sensors, L1-L4, describe the air layer associated with seated occupants and the near-floor region. Sensors H1-H4 enable assessment of thermal stratification and slower mixing near the ceiling, while central sensor C provides a control point. Multipoint measurement identifies zones of delayed air cleaning, stagnant-flow regions and vertical differences that cannot be reliably determined using a single central sensor.

Three air-purifier placement configurations were considered:

- A – centrally along the long wall, favourable in regularly shaped rooms and under dispersed pollution;
- B – near a potential ingress source, i.e. a window or door;
- C – diagonal placement, directed towards the room centre, used in elongated rooms where stagnant-flow regions may develop.

Figure 3 shows the layout of the measurement sensors and purifiers. The blue line denotes the window and the orange line the door.

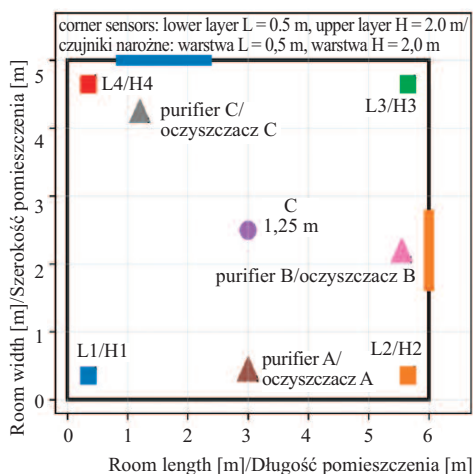


Fig. 3. Layout of L/H/C sensors and air-purifier location variants A, B and C

Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników L/H/C oraz warianty lokalizacji oczyszczacza A, B i C

gdzie:

n – liczba próbek w serii kolokacyjnej [-];
 j – indeks kolejnej próbki pomiarowej [-];
 $C_{i,j}$ – wartość stężenia wskazana przez i -ty czujnik w j -tej próbce [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 $C_{\text{ref},j}$ – wartość referencyjna w j -tej próbce [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 $\bar{C}_{\text{ref}}$ – średnia wartość referencyjna w serii [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 B_i – średni błąd systematyczny i -tego czujnika [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 RMSE_i – pierwiastek błędu średniokwadratowego [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
 R_i^2 – współczynnik determinacji [-].

Przyjęto, że czujnik może zostać wykorzystany w analizie, jeżeli jednocześnie spełnia kryteria małego biasu, niskiego RMSE, wysokiego R^2 oraz braku nadmiernego dryftu po zakończeniu serii pomiarowej. Kryteria akceptacji czujnika: błąd średni względem referencji nie większy niż 3 – 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w zakresie niskim i średnim; R^2 powyżej 0,85; brak danych poniżej 5% próby oraz dryft po zakończeniu serii mniejszy niż 10% względem mediany sieci. Czujniki niespełniające warunków zostały wyłączone z analizy albo zastosowano osobny współczynnik korekcyjny.

Schemat badawczy i warianty ustawienia

W każdym pomieszczeniu przyjęto dziewięć punktów pomiarowych. Cztery czujniki L1-L4 umieszczono w narożach na wysokości 0,5 m, cztery czujniki H1-H4 w tych samych narożach na wysokości 2,0 m, a czujnik C w środku pomieszczenia na wysokości 1,25 m. Taki układ pozwala ocenić jednocześnie gradient poziomy, gradient pionowy i reprezentatywność punktu centralnego. Minimalna odległość czujnika od ściany powinna wynosić 0,5 m, chyba że to uniemożliwia geometria pomieszczenia.

Zastosowanie dziewięciu czujników uzasadniono potrzebą wyznaczenia uproszczonej mapy strefowej pomieszczenia, a nie jedynie pojedynczej wartości reprezentatywnej. Czujniki dolne L1-L4 opisują warstwę powietrza odpowiadającą strefie przebywania osób w pozycji siedzącej oraz obszaru przypoaszkowego, czujniki H1-H4 pozwalają ocenić wpływ stratyfikacji termicznej i wolniejszego mieszania przy suficie, natomiast czujnik centralny C pełni funkcję punktu kontrolnego. Wielopunktowość umożli

wia identyfikację stref opóźnionego oczyszczania, martwych stref przepływu oraz różnic pionowych, których nie można wiarygodnie wyznaczyć na podstawie jednego czujnika centralnego.

W analizie zastosowano trzy konfiguracje ustawienia oczyszczacza powietrza:

- A – ustawienie centralne przy długiej ścianie, korzystne w pomieszczeniach regularnych i przy rozproszonym zanieczyszczeniu;
- B – ustawienie w pobliżu potencjalnego źródła napływu, czyli okna lub drzwi;
- C – ustawienie przekątne, skierowane do środka pomieszczenia, stosowane w pomieszczeniach wydłużonych, w których mogą powstawać martwe strefy przepływu.

Schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych i oczyszczaczy pokazano na rysunku 3. Kreską niebieską oznaczono okno, natomiast pomarańczową drzwi.

Research model of the test scenarios

The term *lab* denotes a distinct research scenario: a single test case with specified room geometry, pollution source, sensor configuration, purifier location and device operating mode. Results were obtained from the research model to develop a pilot test matrix and assess indicator sensitivity to device location, room volume and the vertical temperature distribution. The calculations used a concentration-decay model following a pollution pulse, supplemented by factors for purifier location, thermal stratification and random measurement noise.

The effective CADR in the research model was corrected using a location factor p_A , p_B or p_C and a thermal-stratification factor. The values of p depended on room geometry and the dominant pollution source. When the source was a window or door, variant B was preferred; for long, narrow rooms, variant C was preferred; and for dispersed pollution, variant A was preferred. The stratification factor reduced mixing effectiveness in rooms with a greater temperature difference between the lower and upper air layers.

For each research scenario, an initial PM_{2.5} pulse of approximately 80–110 µg/m³, a background level of 5–8 µg/m³, and random measurement noise representative of low-cost optical sensors were assumed. Individual sensors had different initial concentrations according to their positions relative to the source. Slower mixing was assumed at corners and in the upper layer, especially under a larger temperature gradient. T₉₀ denoted the time required to reduce the excess concentration by 90%, and T₉₅ the time required for a 95% reduction. The energy required to reach T₉₅ was determined.

Three operating modes were considered: High, Medium and High-Medium. Under adaptive operation, the device ran in High mode until T₉₀ was reached and then switched to Medium until T₉₅. This scenario corresponds to the practical logic of Smart Building automation: a rapid response to a PM pulse, followed by lower power consumption and noise after most of the pollution has been removed.

Mathematical model of the test configurations

The research model of the test configurations was based on a simplified one-dimensional model of excess PM_{2.5} concentration decay following a pollution pulse. The model does not replace CFD calculations or comprehensive in situ measurements, but supports test planning, selection of placement variants, and assessment of the expected order of magnitude of air-cleaning time and energy consumption. The effects of local turbulence, heat sources, occupants and mechanical ventilation were represented by correction factors. The results should therefore be interpreted as a model-based foundation for validation rather than a definitive description of an actual room.

Volume of the room analysed:

$$V = L \cdot W \cdot H \quad (7)$$

where:

L – room length [m];

Model badawczy labów

Termin *lab* oznacza wydzielony scenariusz badawczy, czyli pojedynczy przypadek testowy z określoną geometrią pomieszczenia, źródłem zanieczyszczeń, konfiguracją czujników, lokalizacją oczyszczacza oraz trybem pracy urządzenia. Dane wynikowe wyznaczono w modelu badawczym, aby przygotować matrycę badań pilotażowych i sprawdzić wrażliwość wskaźników na lokalizację urządzenia, kubaturę pomieszczenia oraz pionowy rozkład temperatury. W obliczeniach wykorzystano model zaniku stężenia po impulsie zanieczyszczenia, uzupełniony o współczynniki lokalizacji oczyszczacza, stratyfikacji termicznej i losowego szumu pomiarowego.

Efektywna wartość CADR w modelu badawczym podlegała korekcji współczynnikiem lokalizacji p_A , p_B lub p_C oraz współczynnikiem stratyfikacji termicznej. Wartości p zależały od geometrii pomieszczenia i dominującego źródła zanieczyszczeń. Jeżeli jego źródłem było okno lub drzwi, preferowano wariant B, jeżeli pomieszczenie było podłużne, preferowany był wariant C, a jeżeli zanieczyszczenie było rozproszone – wariant A. Współczynnik stratyfikacji zmniejszał efektywność mieszania w pomieszczeniach o większej różnicy temperatury między warstwą dolną i górną.

W przypadku każdego scenariusza badawczego przyjęto początkowy impuls PM_{2.5} rzędu 80–110 µg/m³, tło 5–8 µg/m³ i losowy szum pomiarowy odpowiadający pracy optycznych czujników niskokosztowych. Poszczególne czujniki wykazywały różne stężenie początkowe, zgodnie z położeniem względem źródła. W narożach i w warstwie górnej założono wolniejsze mieszanie, zwłaszcza przy większym gradiencie temperatury. T₉₀ oznaczał czas redukcji nadwyżki stężenia o 90%, a T₉₅ czas redukcji o 95%. Wyznaczono energię T₉₅.

Rozważono trzy tryby pracy: High, Medium oraz High-Medium. W trybie adaptacyjnym urządzenie pracowało w trybie High do osiągnięcia T₉₀, a następnie przełączało się na Medium do osiągnięcia T₉₅. Taki scenariusz odpowiada praktycznej logice automatyzacji Smart Building: szybka reakcja na impuls PM, a następnie redukcja poboru mocy i hałasu po opanowaniu głównej części zanieczyszczenia.

Model matematyczny badanych konfiguracji testowych

Model badawczy konfiguracji testowych bazował na uproszczonym modelu jednowymiarowego zaniku nadwyżki stężenia PM_{2.5} po impulsie zanieczyszczenia. Model nie zastępuje obliczeń CFD ani pełnych pomiarów in situ, ale pozwala przygotować plan badań, dobrać warianty lokalizacji i sprawdzić oczekiwany rząd wielkości czasu oczyszczania oraz energii. Wpływ lokalnych turbulencji, źródeł ciepła, obecności użytkowników i pracy wentylacji mechanicznej ujęto w formie współczynników korekcyjnych. Wyniki należy więc interpretować jako modelową podstawę do walidacji, a nie jako końcowy opis rzeczywistego pomieszczenia.

Kubatura analizowanego pomieszczenia:

$$V = L \cdot W \cdot H \quad (7)$$

gdzie:

L – długość pomieszczenia [m];

W – width [m];
H – height [m];
V – room volume [m³].

Effective air-cleaning capacity corrected for location and thermal conditions:

$$CADR_{eff,j} = CADR \cdot p_j \cdot \varphi_T \cdot \varphi_g \quad (8)$$

where:

CADR – rated clean-air flow rate [m³/h]; converted to [m³/min] for time-based calculations;

CADR_{eff,j} – effective clean-air flow rate for placement variant *j* [m³/min];

j – purifier placement variant: A, B or C [-];

p_j – location factor [-];

φ_T – thermal-stratification factor [-];

φ_g – geometry and obstruction factor [-].

PM2.5 concentration decay coefficient:

$$k_{i,j} = \frac{CADR_{eff,j}}{V} + \lambda + s_i \quad (9)$$

where:

$k_{i,j}$ – PM2.5 concentration decay coefficient at measurement point *i* for placement variant *j* [min⁻¹];

λ – coefficient representing air exchange and natural aerosol loss [min⁻¹];

s_i – local correction for measurement point *i* [min⁻¹];

i – measurement-point index [-];

j – placement variant [-].

PM2.5 concentration decay following a pollution pulse:

$$C_{i,j}(t) = C_{bg,i} + (C_{0,i} - C_{bg,i}) \exp(-k_{i,j}t) + \eta_i(t) \quad (10)$$

where:

$C_{i,j}(t)$ – PM2.5 concentration at measurement point *i* for placement variant *j* at time *t* [μg/m³];

$C_{0,i}$ – initial value after the pollution pulse [μg/m³];

$C_{bg,i}$ – background value [μg/m³];

$k_{i,j}$ – decay coefficient [min⁻¹];

t – time from the start of the air-cleaning phase [min];

$\eta_i(t)$ – measurement noise and local flow fluctuation [μg/m³].

Time to achieve a specified reduction *q*

$$T_q = -\frac{\ln(1-q)}{k} \quad (11)$$

where:

T_q – time to achieve the specified reduction in excess concentration [min];

q – required degree of reduction in excess concentration [-];

k – concentration decay coefficient [min⁻¹].

For *q* = 0.90, T90 is obtained; for *q* = 0.95 → T95, is obtained. In this model, the time increases with room volume and decreases with increasing effective CADR. Expanded expressions for T90 and T95:

$$T_{90} = \frac{\ln(10)}{k} \quad T_{95} = \frac{\ln(20)}{k} \quad (12)$$

Equation (12) was used to compare purifier placement variants and High, Medium and High-Medium operation.

Energy consumed to reach threshold T_q at constant power:

$$E_q = \frac{P \cdot T_q}{60} \quad (13)$$

where:

P – device power [W];

W – szerokość [m];
H – wysokość [m];
V – kubatura pomieszczenia [m³].

Efektowna wydajność oczyszczania skorygowana o lokalizację i warunki cieplne.

$$CADR_{eff,j} = CADR \cdot p_j \cdot \varphi_T \cdot \varphi_g \quad (8)$$

gdzie:

CADR – katalogowy strumień czystego powietrza [m³/h]; w obliczeniach czasowych przeliczany na [m³/min];

CADR_{eff,j} – efektywny strumień czystego powietrza w przypadku wariantu lokalizacji *j* [m³/min];

j – wariant lokalizacji oczyszczacza: A, B albo C [-];

p_j – współczynnik lokalizacji [-];

φ_T – współczynnik stratyfikacji termicznej [-];

φ_g – współczynnik geometrii i przeszkód [-].

Współczynnik zaniku stężenia PM2.5:

$$k_{i,j} = \frac{CADR_{eff,j}}{V} + \lambda + s_i \quad (9)$$

gdzie:

$k_{i,j}$ – współczynnik zaniku stężenia PM2.5 w *i*-tym punkcie pomiarowym w przypadku wariantu lokalizacji *j* [min⁻¹];

λ – współczynnik wymiany powietrza i naturalnego ubytku aerozolu [min⁻¹];

s_i – poprawka lokalną *i*-tego punktu pomiarowego [min⁻¹];

i – indeks punktu pomiarowego [-];

j – wariant lokalizacji [-].

Zanik stężenia PM2.5 po impulsie zanieczyszczenia:

$$C_{i,j}(t) = C_{bg,i} + (C_{0,i} - C_{bg,i}) \exp(-k_{i,j}t) + \eta_i(t) \quad (10)$$

gdzie:

$C_{i,j}(t)$ – stężenie PM2.5 w *i*-tym punkcie pomiarowym dla wariantu lokalizacji *j* w chwili *t* [μg/m³];

$C_{0,i}$ – wartość początkowa po impulsie zanieczyszczenia [μg/m³];

$C_{bg,i}$ – wartość tła [μg/m³];

$k_{i,j}$ – współczynnik zaniku [min⁻¹];

t – czas od początku fazy oczyszczania [min];

$\eta_i(t)$ – szum pomiarowy i lokalna fluktuacja przepływu [μg/m³].

Czas osiągnięcia zadanej redukcji *q* [min].

$$T_q = -\frac{\ln(1-q)}{k} \quad (11)$$

gdzie:

T_q – czas osiągnięcia zadanej redukcji nadwyżki stężenia [min];

q – wymagany stopień redukcji nadwyżki stężenia [-];

k – współczynnik zaniku stężenia [min⁻¹].

W przypadku *q* = 0.90 otrzymuje się T90, a *q* = 0.95 → T95. W tym modelu czas rośnie wraz z kubaturą i maleje wraz ze wzrostem efektywnego CADR. Czas T90 i T95 w zapisie rozwiniełym:

$$T_{90} = \frac{\ln(10)}{k} \quad T_{95} = \frac{\ln(20)}{k} \quad (12)$$

Równanie (12) wykorzystano do porównania wariantów lokalizacji oczyszczacza oraz trybów High, Medium i High-Medium.

Energia zużyta do osiągnięcia progu T_q przy stałej mocy:

$$E_q = \frac{P \cdot T_q}{60} \quad (13)$$

gdzie:

P – moc urządzenia [W];

T_q – time [min];
 E_q – energy [Wh].

Energy in adaptive High-Medium operation:

$$E_{\text{adapt}} = \frac{P_H \cdot T_{90,H}}{60} + \frac{P_M \cdot (T_{95,\text{adapt}} - T_{90,H})}{60} \quad (14)$$

Adaptive operation consists of high-power operation until T90 is reached, followed by Medium operation until T95.

Mean spatial concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in the nine-sensor network:

$$\bar{C}(t) = 1/9 \sum_{i=1}^9 C_i(t) \quad (15)$$

where:

$C_i(t)$ – PM2.5 concentration at measurement point i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

i – sensor index [-];

9 – number of measurement points in the network [-];

t – measurement time [min].

The spatial mean is used to assess the overall air-cleaning effect throughout the room.

Spatial coefficient of variation of the concentration distribution

$$CV(t) = \frac{\sqrt{1/9 \sum_{i=1}^9 (C_i(t) - \bar{C}(t))^2}}{\bar{C}(t)} \quad (16)$$

CV describes the uniformity of air cleaning. A lower value indicates a more uniform PM2.5 concentration distribution within the room.

Vertical concentration difference between the upper and lower layers [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]:

$$\Delta C_v(t) = \bar{C}_H(t) - \bar{C}_L(t) \quad (17)$$

where:

$\bar{C}_H(t)$ – mean PM2.5 concentration in the upper layer [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$\bar{C}_L(t)$ – mean PM2.5 concentration in the lower layer [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

t – measurement time [min].

The value of ΔC_v enables assessment of the effect of temperature distribution and air stratification on air-cleaning performance in the occupied layer.

Worked example for research scenario L06

The adopted dimensions of meeting room L06 were $6.0 \times 5.0 \times 3.0$ m. Purifier P2, the best placement B, and High operation were used. The example illustrates the calculation of T90, T95 and E95 from geometric and energy-related parameters.

Volume of room L06:

$$V_{L06} = 6,0 \cdot 5,0 \cdot 3,0 = 90 \text{ m}^3 \quad (18)$$

Decay coefficient determined from T95 in High mode:

$$k_{L06,H} = \frac{\ln(20)}{50,4} = 0,0594 \text{ min}^{-1} \quad (19)$$

T90 in High mode:

$$T_{90,L06,H} = \frac{\ln(10)}{0,0594} = 38,8 \text{ min} \quad (20)$$

T_q – czas [min];
 E_q – energia [Wh].

Energia w trybie adaptacyjnym High-Medium:

$$E_{\text{adapt}} = \frac{P_H \cdot T_{90,H}}{60} + \frac{P_M \cdot (T_{95,\text{adapt}} - T_{90,H})}{60} \quad (14)$$

Tryb adaptacyjny opisuje pracę z dużą mocą do osiągnięcia T90, a następnie przełączenie na tryb Medium do osiągnięcia T95.

Średnie stężenie przestrzenne [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] w sieci dziewięciu czujników:

$$\bar{C}(t) = 1/9 \sum_{i=1}^9 C_i(t) \quad (15)$$

gdzie:

$C_i(t)$ – stężenie PM2,5 w i -tym punkcie pomiarowym [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

i – indeks czujnika [-];

9 – liczba punktów pomiarowych w sieci [-];

t – czas pomiaru [min].

Średnia przestrzenna służy do oceny globalnego efektu oczyszczania w całym pomieszczeniu.

Współczynnik zmienności przestrzennej rozkładu stężenia [-]:

$$CV(t) = \frac{\sqrt{1/9 \sum_{i=1}^9 (C_i(t) - \bar{C}(t))^2}}{\bar{C}(t)} \quad (16)$$

Współczynnik CV opisuje jednorodność oczyszczania. Im mniejsza jego wartość, tym bardziej równomierny rozkład stężenia PM2,5 w pomieszczeniu.

Pionowa różnica stężeń między warstwą górną i dolną [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]:

$$\Delta C_v(t) = \bar{C}_H(t) - \bar{C}_L(t) \quad (17)$$

gdzie:

$\bar{C}_H(t)$ – średnie stężenie PM2,5 w warstwie górnej [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

$\bar{C}_L(t)$ – średnie stężenie PM2,5 w warstwie dolnej [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

t – czas pomiaru [min].

Wartość ΔC_v pozwala ocenić wpływ rozkładu temperatury i stratyfikacji powietrza na skuteczność oczyszczania w warstwie przebywania użytkowników.

Przykład obliczeniowy w przypadku scenariusza badawczego L06

Przyjęto wymiary sali spotkań L06: $6,0 \times 5,0 \times 3,0$ m, oczyszczacz P2, najlepszą lokalizację B oraz tryb High. Przykład pokazuje sposób przejścia od parametrów geometrycznych i energetycznych do wskaźników T90, T95 oraz E95.

Kubatura pomieszczenia L06:

$$V_{L06} = 6,0 \cdot 5,0 \cdot 3,0 = 90 \text{ m}^3 \quad (18)$$

Współczynnik zaniku wyznaczony z czasu T95 i trybu High:

$$k_{L06,H} = \frac{\ln(20)}{50,4} = 0,0594 \text{ min}^{-1} \quad (19)$$

Czas T90 i tryb pracy High:

$$T_{90,L06,H} = \frac{\ln(10)}{0,0594} = 38,8 \text{ min} \quad (20)$$

Energy to reach T95 in High mode:

$$E_{95,L06,H} = \frac{54 \cdot 50,4}{60} = 45,4 \text{ Wh} \quad (21)$$

Energy in adaptive operation:

$$E_{L06,adapt} = \frac{54 \cdot 38,8}{60} + \frac{17 \cdot (57,6 - 38,8)}{60} = 40,2 \text{ Wh} \quad (22)$$

The example shows that adaptive operation maintains a short initial response time while reducing energy consumption relative to continuous High operation.

Model-based results and preliminary validation of the model

Table 3 presents the model-based results for fifteen test cases (Table 2). It lists the best location according to T95 in High mode, the placement ranking, and time and energy in High and adaptive operation. The results support physical intuition: variant A is generally favourable in regular rooms, variant B in rooms with dominant ingress through a window or door, and variant C in long, narrow rooms. Differences between results increase with room volume, where a single purifier operates close to the limits of its capacity.

Limited validation was adopted for one reference room, L06, and three purifier locations, A, B and C. The model-derived mean PM2.5 concentration profile was compared with a control profile containing random deviations representative of optical PM sensor operation and local flow fluctuations. This validation is not a full experimental study, but allows assessment of trend agreement, the ranking of placement

Energia w przypadku T95 i trybu High:

$$E_{95,L06,H} = \frac{54 \cdot 50,4}{60} = 45,4 \text{ Wh} \quad (21)$$

Energia w trybie adaptacyjnym:

$$E_{L06,adapt} = \frac{54 \cdot 38,8}{60} + \frac{17 \cdot (57,6 - 38,8)}{60} = 40,2 \text{ Wh} \quad (22)$$

Przykład pokazuje, że tryb adaptacyjny pozwala zachować krótki czas reakcji początkowej, a jednocześnie zmniejszyć zużycie energii w porównaniu z ciągłą pracą w trybie High.

Wyniki badań modelowych i wstępna walidacja punktowa modelu

Wyniki badań modelowych piętnastu przypadków testowych (tabela 2) przedstawiono w tabeli 3. Zestawiono najlepszą lokalizację w przypadku T95 i trybu High, ranking lokalizacji, czas i energię w trybie High oraz trybie adaptacyjnym. Wyniki potwierdzają intuicję fizyczną: w pomieszczeniach regularnych zwykle korzystny jest wariant A, w pomieszczeniach z dominującym napływem przez okno lub drzwi wariant B, a w pomieszczeniach podłużnych wariant C. Różnice w wynikach zwiększają się wraz ze wzrostem kubatury pomieszczeń, w których pojedynczy oczyszczacz pracuje blisko granicy swoich możliwości.

Przyjęto ograniczoną walidację punktową dla jednego pomieszczenia referencyjnego L06 oraz trzech lokalizacji oczyszczacza A, B i C. Porównano przebieg średniego stężenia PM2.5 wyznaczony z modelu z przebiegiem kontrolnym zawierającym losowe odchylenie odpowiadające pracy optycznych czujników PM oraz lokalnym fluktuacjom przepływu. Walidacja nie sta-

Table 2. Set of 15 research scenarios corresponding to typical office rooms
Tabela 2. Zestaw 15 scenariuszy badawczych odpowiadających typowym pomieszczeniom biurowym

Scenari- o/ Scena- riusz	Room/Pomieszczenie	Area [m ²]/ Powierz- chnia [m ²]	V [m ³]	Device/ Urząd- zenie	Dominant source/ Dominujące źródło
L01	small office/gabinet mały	10,5	29,4	P1	window/okno
L02	single-person office/pokój 1-osobowy	14,0	39,2	P1	dispersed/rozproszone
L03	two-person office/pokój 2-osobowy	20,0	56,0	P1	window/okno
L04	reference room/ pomieszczenie referencyjne	24,0	72,0	P1	dispersed/rozproszone
L05	corner office/gabinet narożny	27,0	81,0	P2	window/okno
L06	small meeting room/sala spotkań mała	30,0	90,0	P2	door/drzwi
L07	medium-sized office/biuro średnie	35,0	105,0	P2	dispersed/rozproszone
L08	small open-plan office/open office mały	40,0	120,0	P2	window/okno
L09	long, narrow office/biuro podłużne	40,0	120,0	P2	diagonal/przekątna
L10	training room/sala szkoleniowa	48,0	153,6	P2	door/drzwi
L11	conference room/sala konferencyjna	60,0	192,0	P2	dispersed/rozproszone
L12	open-plan space/open space	72,0	230,4	P2	diagonal/przekątna
L13	executive office/gabinet dyrektorski	31,5	94,5	P2	window/okno
L14	design office/pokój projektowy	49,5	148,5	P2	dispersed/rozproszone
L15	elongated coworking space/ coworking podłużny	40,5	121,5	P2	diagonal/przekątna

Table 3. Summary of research-scenario results; ranking denotes the order from the best to the weakest location variant
Tabela 3. Podsumowanie wyników scenariuszy badawczych; ranking oznacza kolejność od najlepszego do najgorszego wariantu lokalizacji

Scenari- o/ Scena- riusz	Ran- king A/B/C	Best variant/ Najlepszy wariant	T95 High [min]	E High [Wh]	T95 Adapt. [min]	E Adapt. [Wh]	CV ₃₀
L01	B > C > A	B	22,0	9,2	24,9	9,6	0,1
L02	A > C > B	A	29,4	12,3	33,2	12,8	0,1
L03	B > C > A	B	42,0	17,5	47,4	18,2	0,09
L04	A > C > B	A	53,1	22,1	59,7	23,0	0,1
L05	B > C > A	B	41,3	37,1	48,8	33,4	0,1
L06	B > A > C	B	46,8	42,1	55,4	37,9	0,1
L07	A > C > B	A	54,4	48,9	64,0	43,9	0,09
L08	C > B > A	C	58,8	52,9	68,7	47,3	0,17
L09	C > B > A	C	61,8	55,6	72,8	49,9	0,15
L10	B > A > C	B	74,1	66,7	86,1	59,5	0,12
L11	C > A > B	C	94,7	85,3	110,5	76,2	0,16
L12	C > B > A	C	106,7	96,0	122,3	85,2	0,14
L13	C > B > A	C	48,5	43,7	57,1	39,2	0,17
L14	C > A > B	C	73,1	65,8	85,3	58,8	0,16
L15	C > A > B	C	60,6	54,6	70,9	48,8	0,16

variants, and the order of magnitude of the time required to reach $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

For variant B, with the purifier closer to the door as the ingress source, the smallest discrepancy between the control profile and the model and the shortest time to reach the threshold were obtained. Variants A and C exhibited slower PM_{2.5} decay and greater discrepancies during the first 30 min. This agrees with the assumption that local turbulence and delayed mixing are most important during the initial air-cleaning phase.

Figure 4 presents the model and control profiles for meeting room L06, where the door was the dominant pollution source. Three purifier locations and an assessment threshold of $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ were adopted. Variant B reduced the mean PM_{2.5} concentration faster than the central and diagonal placements, and the ranking agreed with the tabulated results. This is a limited validation for one room and one scenario; a comprehensive model assessment therefore requires repeated measurements in a larger number of rooms, with different emission sources and ventilation conditions.

Figure 5 shows that T₉₅ increases with room volume but decreases with better matching of the location to the source and room geometry. For L01-L04, which used purifier P1, T₉₅ typically lies within the range of tens of minutes. In larger rooms served by a single P2 purifier, the time is longer, particularly when the floor area exceeds the typical rated range for one device. Figure 6 compares the selected operating mode with the energy required to reach T₉₅.

The energy analysis reveals different characteristics of P1 and P2. For P1, the power difference between High and Medium operation is relatively small, so shortening the operating time by using High may be justified. By contrast, P2 consumes substantially more power in High than in Medium mode, so Medium may have the lowest energy requirement at the expense of a longer air-cleaning time. Adaptive operation does not always minimise energy, but substantially reduces time relative to Medium and energy consumption relative to continuous High operation in large rooms.

The time – energy analysis is complemented by an assessment of spatial uniformity. Figure 7 presents CV₃₀ for the individual test configurations. Values below 0.10 may be treated as indicating good uniformity, while higher values indicate zones of slower air cleaning. In the research model,

nowi pełnego badania eksperymentalnego, ale pozwala sprawdzić zgodność trendu, kolejność wariantów lokalizacji oraz rząd wielkości czasu osiągnięcia progu $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

W przypadku wariantu B (ustawienie oczyszczacza bliżej drzwi jako źródła napływu), uzyskano najmniejszy błąd dopasowania przebiegu kontrolnego do modelu oraz najkrótszy czas osiągnięcia progu, a wariantów A i C odnotowano wolniejsze tempo spadku PM_{2.5} i większe rozbieżności w pierwszych 30 minutach, co jest zgodne z założeniem, że lokalne turbulencje oraz opóźnione mieszanie mają największe znaczenie w początkowej fazie oczyszczania.

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi modelowe i kontrolne w przypadku sali spotkań L06, w której dominującym źródłem zanieczyszczeń były drzwi. Przyjęto trzy lokalizacje oczyszczacza oraz próg oceny $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wariant B szybciej ograniczał średnie stężenie PM_{2.5} niż wariant centralny i przekątny, a kolejność wariantów była zgodna z wynikami tabelarycznymi. Jest to walidacja punktowa, ograniczona do jednego pomieszczenia i jednego scenariusza, dlatego pełna ocena modelu wymaga powtórzenia pomiarów na większej liczbie pomieszczeń, źródeł emisji i warunków wentylacyjnych.

Rysunek 5 pokazuje, że T₉₅ zwiększa się wraz ze wzrostem kubatury pomieszczenia, ale zmniejsza wraz z dopasowaniem lokalizacji do źródła oraz geometrii. W przypadku L01-L04, w których wykorzystano oczyszczacz P1, czas T₉₅ mieści się zwykle w przedziale kilkudziesięciu minut. W przypadku większych pomieszczeń obsługiwanych pojedynczym oczyszczaczem P2 czas jest dłuższy, szczególnie wtedy, gdy powierzchnia przekracza typowy zakres katalogowy dla jednego urządzenia. Zależność między wyborem trybu pracy urządzenia a energią potrzebną do osiągnięcia T₉₅ zestawiono na rysunku 6.

Analiza energetyczna wskazuje na odmienny charakter modeli P1 i P2. W przypadku oczyszczacza P1 różnica mocy między trybem High i Medium jest relatywnie niewielka, dlatego może być uzasadnione skrócenie czasu pracy oczyszczacza w trybie High. Z kolei w przypadku oczyszczacza P2 tryb High ma znacznie większy pobór mocy niż Medium, co powoduje, że tryb średni bywa najtańszy energetycznie, ale kosztem wydłużonego czasu oczyszczania. Tryb adaptacyjny nie zawsze minimalizuje energię, ale wyraźnie skraca czas względem Medium i obniża zużycie energii względem stałego trybu High w dużych pomieszczeniach.

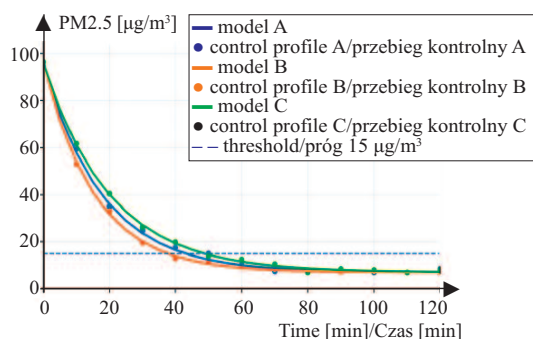


Fig. 4. Preliminary point validation of the model for test configuration L06: PM_{2.5} profiles for three air-purifier locations

Rys. 4. Wstępna walidacja punktowa modelu w przypadku konfiguracji testowej L06: przebieg PM_{2.5} w przypadku trzech lokalizacji oczyszczacza

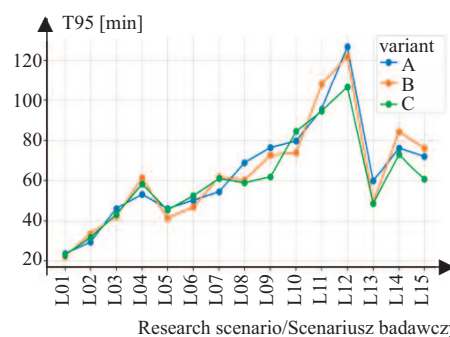


Fig. 5. T₉₅ time in High mode for variants A, B and C in fifteen research scenarios

Rys. 5. Czas T₉₅ w trybie High w przypadku wariantów A, B i C w piętnastu scenariuszach badawczych

larger CV30 values occur in long, narrow rooms and in rooms where air-flow may be obstructed by furniture or by temperature differences between the lower and upper air layers.

Figure 8 presents an example of the spatial PM2.5 distribution in a long, narrow room. Even with the favourable variant C, locally higher concentrations may persist in corners. This supports the use of

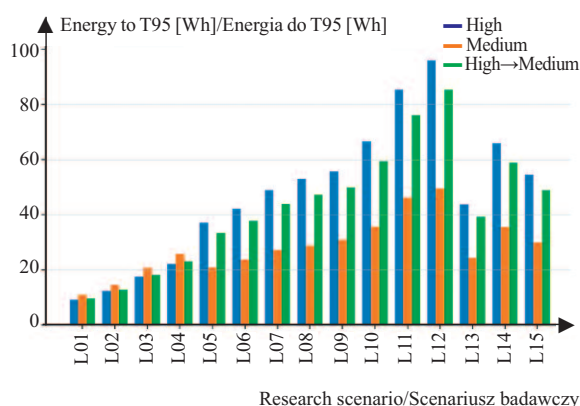


Fig. 6. Energy required to reach T95 in the best location for High, Medium and High-Medium modes

Rys. 6. Energia do osiągnięcia T95 w najlepszej lokalizacji w przypadku trybów High, Medium i High-Medium

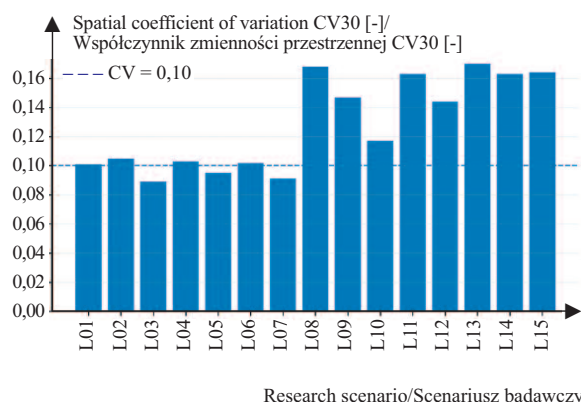


Fig. 7. Coefficient of spatial variation CV30 after 30 minutes in the best location

Rys. 7. Współczynnik zmienności przestrzennej CV30 po 30 minutach w najlepszej lokalizacji

corner sensors at two heights, because a central sensor could underestimate the time required to achieve a uniform air-quality level throughout the room.

Discussion

Selecting a purifier solely on the basis of room floor area is insufficient. Floor area and volume are fundamental parameters, but the actual air-cleaning time also depends on device location. In a small, regularly shaped office, an unfavourable location may be compensated by a high CADR/V ratio. This reserve is smaller in a conference room or open-plan office, making the purifier's position relative to the longitudinal room axis, windows and doors more important.

Variant A performs well in rooms with dispersed pollution or without a clearly identifiable source. Placement centrally along the long wall promotes mixing and reduces differences between measurement points. Variant B is favourable when windows or doors are the pollution source, because the purifier intercepts pollutants before they disperse throughout the room volume. Variant C is particularly useful in long, narrow rooms, where diagonal airflow reduces stagnant regions.

Uzupełnieniem analizy czasowo-energetycznej jest ocena jednorodności przestrzennej. Wartości CV30 w przypadku poszczególnych konfiguracji testowych przedstawiono na rysunku 7. Wartości poniżej 0,10 można traktować jako dobrą jednorodność, natomiast wartości większe sygnalizują obecność stref wolniejszego oczyszczania. W modelu badawczym większe wartości CV30 pojawiają się w pomieszczeniach podłużnych oraz w salach, w których przepływ może być blokowany przez meble lub różnice temperatur między dolną i górną warstwą powietrza.

Rysunek 8 przedstawia przykładowy rozkład przestrzenny PM2.5 w przypadku podłużnego pomieszczenia. Nawet przy korzystnym wariancie C w narożach może utrzymy-

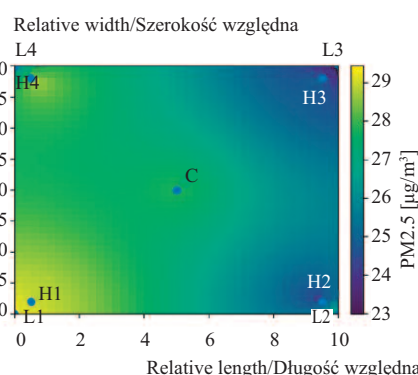


Fig. 8. Example PM2.5 distribution map after 30 minutes for elongated room variant L09, variant C

Rys. 8. Przykładowa mapa rozkładu PM2.5 po 30 minutach w przypadku podłużnego wariantu pomieszczenia L09, wariant C

wać się lokalnie większe stężenie. Uzasadnia to zastosowanie czujników w narożach i na dwóch wysokościach, ponieważ czujnik centralny mógłby zaniżyć ocenę czasu potrzebnego do uzyskania jednorodnego poziomu jakości powietrza w całym pomieszczeniu.

Dyskusja

Dobór oczyszczacza tylko na podstawie powierzchni pomieszczenia jest niewystarczający. Powierzchnia i kubatura to parametry podstawowe, ale rzeczywisty czas oczyszczania zależy również od usytuowania urządzenia. W małym, regularnym gabinecie błąd lokalizacji może być kompensowany przez dużą relację CADR/V. W sali konferencyjnej albo open space ta rezerwa jest mniejsza, dlatego na znaczeniu zyskuje tam relatywne położenie oczyszczacza względem długiej osi pomieszczenia, okien i drzwi.

Wariant A sprawdza się w pomieszczeniach, w których zanieczyszczenie jest rozproszone albo źródło nie jest jednoznaczne. Ustawienie centralne przy długiej ścianie ułatwia mieszanie i ogranicza różnice między punktami pomiarowymi. Wariant B jest korzystny wtedy, gdy źródłem zanieczyszczenia, są okna lub drzwi, ponieważ oczyszczacz przechwytuje zanieczyszczenia, zanim rozprzestrzenią się po całej kubaturze pomieszczenia. Wariant C jest szczególnie przydatny

The results support control based on several sensors rather than on a single sensor integrated into the purifier. The built-in sensor mainly indicates air quality at the inlet, whereas the sensor network identifies locations where air cleaning is slower. Home Assistant can aggregate data as the mean, median, maximum value and vertical gradient.

In practical purifier control, it is recommended to consider not only the mean PM2.5 concentration but also values representing more polluted measurement locations, based on the 80th or 90th percentile. This avoids a situation in which purifier output is reduced while elevated concentrations persist in part of the room.

A major limitation is the use of a simplified single-zone room model with spatial corrections. Actual airflow depends on the shape of the discharge jet, obstruction layout, local turbulence, heat sources, occupants, mechanical ventilation and outdoor conditions. These factors were represented in a simplified manner, so the results should not be treated as a substitute for comprehensive CFD analyses or in situ measurements.

In the main study, the model should be validated in several representative rooms and subsequently extended to a multizone model or CFD analysis of selected layouts. The in situ performance of portable air purifiers varies over time and between environments, and rated CADR does not fully capture this variability [9 – 11].

A second limitation concerns the optical sensors. The PMS5003 is useful for monitoring trends, but its readings depend on aerosol optical properties, humidity, particle-size distribution and the manufacturer's algorithms [7]. Accordingly, LookO2 V4 data in scientific studies should be treated as calibrated or normalised data rather than as a direct equivalent of reference measurements. Relative humidity also requires particular attention, because water aerosol may be interpreted as an increase in particle number.

Preliminary energy analysis and operational recommendations

Energy analysis should address not only total energy consumption but also the intended operational objective. High mode is appropriate for rapid concentration reduction; Medium or Auto is advantageous for maintaining air quality during working hours.

When a compromise is required, adaptive operation is indicated: High until T90, then Medium until T95, followed by Low/Auto for maintenance.

Where the floor area exceeds the recommended rated range of one device, two lower-power purifiers should be considered instead of one operating continuously in High mode (Table 4).

w pomieszczeniach podłużnych, w których przepływ wzdłuż przekątnej ogranicza martwe strefy.

Wyniki potwierdzają zastosowanie sterowania bazującego na kilku czujnikach, a nie na jednym czujniku wbudowanym w oczyszczacz. Czujnik w urządzeniu informuje głównie o jakości powietrza przy wlocie, natomiast sieć czujników pozwala wykryć miejsca, w których powietrze oczyszcza się wolniej. System Home Assistant może agregować dane w postaci średniej, mediany, wartości maksymalnej oraz gradientu pionowego. W praktycznym sterowaniu oczyszczaczem zaleca się uwzględnienie nie tylko średniego stężenia PM2,5, lecz także wartości reprezentujących bardziej zanieczyszczone punkty pomiarowe, oparte na osiemdziesiątym lub dziewięćdziesiątym percentylu. Pozwala to uniknąć sytuacji, w której oczyszczacz zmniejszy wydajność mimo utrzymywania się podwyższonego stężenia w części pomieszczenia.

Istotne ograniczenie modelu badawczego stanowi zastosowanie uproszczonego, jednostrefowego modelu pomieszczenia z korektami przestrzennymi. Rzeczywisty przepływ zależy od kształtu strumienia wywiewanego z oczyszczacza, układu przeszkód, lokalnych turbulencji, źródeł ciepła, obecności użytkowników, pracy wentylacji mechanicznej oraz warunków zewnętrznych. Czynniki przyjęto w sposób uproszczony, dlatego wyników nie należy traktować jako zamiennika pełnych analiz CFD ani pomiarów in situ. W badaniach właściwych model powinien zostać zwalidowany w kilku reprezentatywnych pomieszczeniach, a następnie rozszerzony o model wielostrefowy lub analizę CFD wybranych układów. Skuteczność oczyszczaczy przenośnych w warunkach in situ zmienia się bowiem w czasie i między środowiskami, a wartość katalogowa CADR nie oddaje w pełni tej zmienności [9 – 11].

Drugim ograniczeniem jest charakter czujników optycznych. PMS5003 jest użytecznym modulem do monitoringu trendów, lecz jego wskazania zależą od właściwości optycznych aerozolu, wilgotności, rozkładu rozmiarów cząstek i algorytmów producenta [7]. W związku z tym w badaniach naukowych dane z LookO2 V4 powinny być traktowane jako dane po kalibracji lub normalizacji, a nie jako bezpośredni odpowiednik pomiaru referencyjnego. Szczególnej uwagi wymaga również wilgotność względna powietrza, ponieważ aerozol wodny może być interpretowany jako wzrost liczby cząstek.

Wstępna analiza energetyczna i rekomendacje eksploatacyjne

Analiza energetyczna nie powinna ograniczać się tylko do całkowitego zużycia energii, ale również obejmować cel użytkowy. Jeżeli jest nim szybkie zmniejszenie stężenia, właściwy jest tryb High, natomiast jeżeli utrzymanie jakości powietrza w godzinach pracy, korzystny jest tryb Medium lub Auto, a gdy celem jest kompromis, wskazany jest tryb adaptacyjny: High do osiągnięcia T90, następnie Medium do T95 i Low/Auto w stanie podtrzymania.

W przypadku powierzchni większej niż zalecany zakres katalogowy jednego urządzenia należy rozważyć dwa oczyszczacze o mniejszej mocy zamiast jednego stale pracującego w trybie High. Zalecane tryby pracy oczyszczaczy przedstawiono w tabeli 4.

Table 4. Proposed air-purifier control logic in a Smart Building system

Tabela 4. Proponowana logika sterowania oczyszczaczem w systemie Smart Building

Control condition/Warunek sterowania	Recommended mode/ Zalecany tryb	Rationale/Uzasadnienie
PM _{2.5} > 35 µg/m ³ or rapid increase > 5 µg/m ³ /min/ PM _{2.5} > 35 µg/m ³ lub szybki wzrost > 5 µg/m ³ /min	high	rapid reduction of the pulse and exposure/szybka redukcja impulsu i ograniczenie ekspozycji
15 – 35 µg/m ³	medium	compromise between air-cleaning time and energy/ kompromis między czasem oczyszczania i energią
10–15 µg/m ³ and a decreasing trend/10 – 15 µg/m ³ oraz malejący trend	low/auto	maintenance of air quality/podtrzymanie jakości powietrza
< 10 µg/m ³ for at least 15 min/ < 10 µg/m ³ przez minimum 15 min	auto or intermittent switch-off/ auto lub okresowe wyłączenie	minimisation of energy and noise/minimalizacja energii i hałasu
Large inter-sensor gradient or CV > 0.15/ Wysoki gradient między czujnikami lub CV > 0,15	high + relocation/high + korekta lokalizacji	indication of stagnant zones or poor device placement/ objaw martwych stref lub złego ustawienia urządzenia

Conclusions

• The proposed methodology combines multipoint PM measurement, sensor calibration/normalisation and energy analysis.

• In the modelled scenarios, purifier location substantially affected T95. Variant B was best for pollution sources at a window or door, variant A for regular rooms, and variant C for long, narrow rooms.

• The nine-sensor network reveals spatial and vertical differences that would not be detected by measurements solely at the room centre.

Purifier P1 is suitable for small and medium-sized offices within its declared area range, whereas P2 is suitable for larger rooms. However, in open-plan spaces above 40 m², a single device should be regarded as a limiting configuration.

• High operation minimises air-cleaning time, Medium minimises energy consumption, and High–Medium provides a practical compromise for Smart Building automation.

• Preliminary validation in one room and at three locations allows assessment of agreement with the modelled trend, but does not replace empirical validation. Obtaining robust real-world results requires sensor collocation, documentation of humidity and temperature, reproducible generation of the PM pulse, and extension of model validation to several rooms and ventilation operating conditions.

Received: 26.03.2026

Revised: 14.05.2026

Published: 23.09.2026

Wnioski

• Zaproponowana metodyka łączy wielopunktowy pomiar PM, kalibrację/normalizację czujników oraz analizę energetyczną.

• W badanych scenariuszach modelowych lokalizacja oczyszczacza istotnie wpływała na T95. Wariant B był najlepszy w przypadku źródła zanieczyszczeń przy oknie lub drzwiach, wariant A w pomieszczeniach regularnych, a wariant C w pomieszczeniach podłużnych.

• Sieć dziewięciu czujników ujawnia różnice przestrzenne i pionowe, które byłyby niewidoczne przy pomiarze wyłącznie w centrum pomieszczenia.

Oczyszczacz P1 sprawdza się w małych i średnich gabinetach w zakresie deklarowanej powierzchni, natomiast oczyszczacz P2 w większych pomieszczeniach, chociaż w przypadku zastosowania w pomieszczeniach open space o powierzchni powyżej 40 m² pojedyncze urządzenie należy traktować jako wariant graniczny.

• Tryb High minimalizuje czas oczyszczania, Medium – zużycie energii, a tryb High-Medium stanowi praktyczny kompromis w przypadku automatyzacji Smart Building.

• Wstępna walidacja punktowa w przypadku jednego pomieszczenia i trzech lokalizacji pozwala sprawdzić zgodność trendu modelowego, ale nie zastępuje walidacji empirycznej. W celu uzyskania właściwych wyników rzeczywistych konieczne jest przeprowadzenie kolokacji czujników, dokumentowanie wilgotności i temperatury, powtarzalne wywoływanie impulsu PM oraz rozszerzenie walidacji modelu na kilka pomieszczeń i warunków pracy wentylacji.

Artykuł wpłynął do redakcji: 26.03.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.05.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

[1] World Health Organization, WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, 2021.

[2] ASHRAE, Filtration/Disinfection – In-room or portable air cleaners, guidance on CADR and placement.

[3] Oczyszczacz P1, karta/instrukcja produktu: CADR 216 m³/h, moc maksymalna 25 W, pomieszczenia do 26 m².

[4] Oczyszczacz P2, karta/instrukcja produktu: CADR 306 m³/h, moc 54/17/5 W, pomieszczenia do około 38 m².

[5] PN-N-01307:1994, Hałas. Dopuszczalne wartości parametrów hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów. PKN, 1994.

[6] LookO2, LookO2 V4 Sensor Manual oraz opis czujnika LookO2 V4, 2022 – 2023.

[7] Plantower Technology, PMS5003 Laser PM_{2.5} Sensor – technical parameters.

[8] U. S. EPA, Air Sensor Collocation Instruction Guide/Air Sensor Collocation, 2026.

[9] Applied Sciences, Assessment of a Portable Air Cleaning Device Performance in Eliminating Indoor Air Contaminants by Considering Particle Transport Characteristics, 2024.

[10] Emmerich SJ, Nabinger SJ. Measurement and Simulation of the IAQ Impact of Particle Cleaners in a Single-Zone Building, NIST, 2000.

[11] Building and Environment, An in-situ test method for portable air cleaners, 2025; oraz literatura dotycząca zmienności skuteczności PAC w warunkach rzeczywistych.