

Szybkość dostarczania czystego powietrza i skuteczność usuwania cząstek aerozoli jako wskaźniki oczyszczania powietrza w budynkach

Clean air delivery rate and aerosol particle removal efficiency as indicators of air purification in buildings

TOMASZ JANKOWSKI, SZYMON KAMOCKI

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.05.02

Jakość powietrza wewnątrz w budynkach jest ściśle powiązana z eliminowaniem źródeł zanieczyszczeń powietrza oraz regulowaniem stężenia szkodliwych czynników chemicznych, pyłowych i biologicznych w poszczególnych pomieszczeniach. Istotną rolę w poprawie jakości powietrza mogą odgrywać wentylacja i klimatyzacja. W przypadku gdy pomieszczenia są słabo wentylowane, rozwiązaniem może być zastosowanie oczyszczaczy powietrza. Wysokie oczekiwania użytkowników oraz szeroki wybór oczyszczaczy powietrza dostępnych na rynku determinują konieczność oceny skuteczności urządzeń do oczyszczania powietrza, zarówno projektowanych, jak i już użytkowanych, w warunkach rzeczywistych, na rynku krajowym i międzynarodowym. W badaniach potwierdzono, że oczyszczacze powietrza mogą oczyszczać powietrze zgodnie z wyznaczonym parametrem CADR w stabilnych warunkach otoczenia, a także umożliwiają obniżenie stężenia pyłów zawieszonych PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ oraz cząstek ultradrobnych, poniżej 700 nm, w rzeczywistych i zmiennych warunkach środowiskowych pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia powietrza, jakość powietrza, oczyszczacze powietrza, komora laboratoryjna

Indoor air quality in buildings is closely linked to eliminating sources of air pollution and regulating the concentration of harmful chemical, particulate, and biological agents in individual rooms. Ventilation and air conditioning can play a significant role in improving air quality. Where rooms are poorly ventilated, the use of air purifiers can provide a solution. High user expectations and the wide selection of air purifiers available on the market dictate the need to assess the effectiveness of air purification devices being designed or already in use under real-world conditions, both domestically and internationally. Studies have confirmed that air purifiers can purify air in accordance with the designated CADR parameter under stable ambient conditions, while also reducing the concentration of suspended PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, and ultrafine particles (below 700 nm) under the actual and variable environmental conditions of a room intended for human occupation.

Keywords: air pollution, air quality, air purifiers, laboratory chamber

Wprowadzenie

Stan powietrza w pomieszczeniach odnosi się do jakości powietrza zarówno wewnątrz pomieszczeń, IAQ (ang. Indoor Air Quality), jak i w otoczeniu budynków. Zrozumienie zjawisk rozprzestrzeniania się i kontrolowania emisji zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach może pomóc zmniejszyć ryzyko wystąpienia problemów zdrowotnych i poprawić komfort ludzi w pomieszczeniach budynków. Wpływ zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach na zdrowie ludzi może

być odczuwalny bezpośrednio po narażeniu lub dopiero po wielu latach.

W związku z negatywnymi skutkami zdrowotnymi dla człowieka, jakie niesie narażenie na zanieczyszczenia powietrza, podejmowane są działania mające na celu poprawę jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń.

W przypadku wielu działań ukierunkowanych na poprawę jakości powietrza zewnętrznego potrzebne są rozwiązania systemowe, a ich wdrożenie wymaga kroków legislacyjnych [1]. Jedną z promowanych metod redukcji zanieczyszczeń

powietrza jest modernizacja systemów ogrzewania gospodarstw domowych, na przykład wymiana starych pieców [2].

W przypadku powietrza wewnętrznego najbardziej pożądanym jest wyeliminowanie źródeł zanieczyszczeń powietrza, o ile w ogóle jest to możliwe. Dużą rolę w poprawie jakości i uzdatnianiu powietrza mogą odgrywać wentylacja i klimatyzacja. W sytuacji, gdy pomieszczenia są słabo wentylowane, a stężenia zanieczyszczeń w powietrzu zewnętrznym są niższe niż wewnątrz budynku, rozwiązaniem może być zastosowanie oczyszczaczy powietrza [3].

Wydajność tych urządzeń może być charakteryzowana w warunkach laboratoryjnych przez dwa parametry: szybkość dostarczania czystego powietrza CADR (ang. Clean Air Delivery Rate) lub skuteczność usuwania zanieczyszczeń po jednokrotnym przepuszczeniu powietrza przez filtry SPE (ang. Single-Pass Efficiency), a w warunkach rzeczywistych przez skuteczność usuwania cząstek aerozoli [4, 5]. Obydwa parametry określa się w zależności od rozmiaru cząstek. Podstawową zalecą wskaźnika CADR, w porównaniu ze wskaźnikiem SPE, jest to, że uwzględnia on zarówno skuteczność zastosowanych w oczyszczaczu filtrów, jak i strumień objętości powietrza, z jakim urządzenie pracuje. Parametr CADR dostarcza informacji o wartości przepływu powietrza wolnego od zanieczyszczeń. Skuteczność usuwania opisuje wpływ systemu filtracji na stężenie cząstek pyłów zawieszonych w środowisku wewnętrznym pomieszczeń. Skuteczność zależy od różnych warunków środowiska wewnętrznego, takich jak źródła cząstek, stężenia cząstek na zewnątrz budynków, objętość pomieszczenia oraz krotność wymiany powietrza [6, 7]. Badanie parametru CADR obejmuje testy w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, w których do komory badawczej wprowadzane są znane stężenia cząstek stałych. Im wartość CADR jest większa tym szybciej oczyszczacz powietrza będzie usuwał zanieczyszczenia. Metoda ta ma jednak ograniczenia związane z usuwaniem określonych rozmiarów cząstek, co może nie odzwierciedlać dokładnie szerokiego zakresu rozmiarów cząstek występujących w rzeczywistym środowisku wewnętrznym. Początkowe stężenia cząstek stosowane w tych testach są często znacznie wyższe niż stężenia występujące w otoczeniu [8]. Testy te są zazwyczaj wykonywane z nowymi filtrami zainstalowanymi w oczyszczaczu powietrza i przez krótki okres. Badania prowadzone są na etapie początkowym i nie uwzględniają zmiany wydajności oczyszczacza powietrza w czasie, gdy filtry są obciążane cząstkami aerozoli [9, 10]. W rzeczywistych środowiskach pomieszczeń występują zmienne w czasie źródła cząstek pochodzące z działalności człowieka, które zazwyczaj nie są uwzględniane w testach laboratoryjnych. Wielu badaczy oceniało skuteczność oczyszczaczy powietrza za pomocą modelowania i pomiarów [11-17], jednak nie istnieje żadna znormalizowana procedura umożliwiająca ocenę rzeczywistej wydajności oczyszczaczy powietrza w rzeczywistym środowisku wewnętrznym.

Ograniczona liczba badań oczyszczaczy powietrza jest prowadzona głównie

w kontrolowanych środowiskach wewnętrznych, a badania te wykorzystują przede wszystkim metody oceny oparte na określaniu parametru CADR dla wybranych zanieczyszczeń powietrza [18-20]. Metoda laboratoryjna, mająca na celu scharakteryzowanie parametrów pracy oczyszczaczy powietrza w standardowych warunkach, nie odzwierciedla jednak ich rzeczywistej wydajności. Dlatego kluczowe jest opracowanie metody pomiaru wydajności oczyszczaczy powietrza w konkretnych miejscach, w warunkach rzeczywistych, która pozwoli również ocenić oczekiwaną zmienność tej wydajności w czasie.

Metody badania oczyszczaczy powietrza w CIOP-PIB

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB) posiada kompetencje do klasyfikowania i badania parametrów użytkowych oczyszczaczy powietrza:

- w warunkach laboratoryjnych, zgodnie z ANSI/AHAM AC-1-2020 [21] i AHAM AC-3-2009 (R2021) [22];
- w warunkach użytkowania w pomieszczeniach budynków, zgodnie z metodą opracowaną w Pracowni Aerozoli, Filtracji i Wentylacji Instytutu.

Oczyszczacze powietrza mogą być stosowane zwykle jako wspomagający etap procesu oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń w pomieszczeniach, w których użytkowane są już instalacje:

- ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) budynków;
- wentylacyjne w procesach technologicznych.

Ważnymi normami w dziedzinie badań w warunkach laboratoryjnych jest również seria norm PN-EN IEC 63086. PN-EN IEC 63086-1:2021-01/A1:2024-04 [23] i PN-EN IEC 63086-2-1:2024-10 [24], w których rekomendują stosowanie podobnych metod oceny wskaźnika CADR dla oczyszczaczy powietrza. Z uwagi na objęcie pomiarami szerszego zakresu rozmiarowego cząstek aerozoli do badań w CIOP-PIB wybrano metodę zgodną z ANSI/AHAM AC-1-2020 [21] i AHAM AC-3-2009 (R2021) [22].

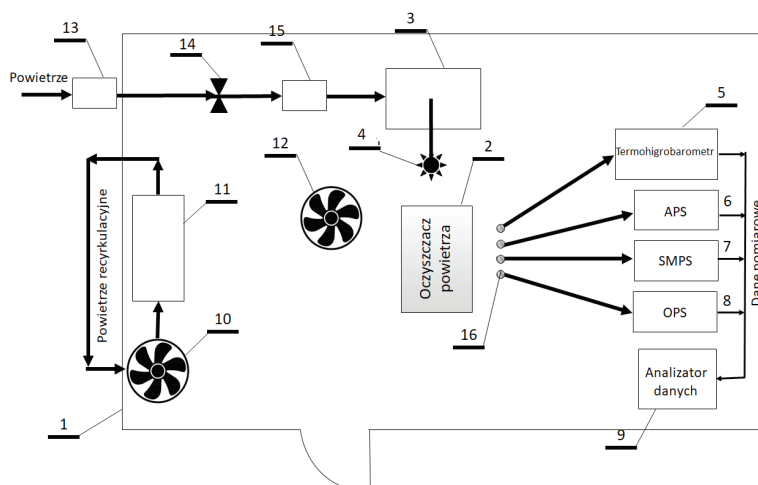
Zgodnie z opracowaną metodą badawczą dotyczącą oczyszczania powietrza w komorze badawczej producent i dystrybutor oczyszczaczy powietrza mogą dobrać odpowiednie projektowe parametry pracy, takie jak przepływ powietrza przez układ filtracyjny oraz wskaźnik szybkości dostarczania czystego powietrza CADR do określonej, znormalizowanej powierzchni pomieszczenia [25].

Dopełnieniem badań laboratoryjnych jest ocena skuteczności usuwania cząstek aerozoli w warunkach użytkowania w pomieszczeniach budynków o określonej kubaturze.

Metody stosowane w CIOP-PIB pozwalają na badanie urządzeń do oczyszczania powietrza, zarówno projektowanych, jak i już użytkowanych, w warunkach rzeczywistych, na rynku krajowym i międzynarodowym.

Stanowisko badawcze w warunkach laboratoryjnych

Schemat stanowiska badania oczyszczaczy powietrza w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na rys. 1.



1 – komora badawcza, 2 – oczyszczacz powietrza, 3 – generator aerozolu testowego SSPD, 4 – zespół rozpylaczy do generowania aerozolu testowego, 5 – termohigrometr LAB-EL, 6 – spektrometr APS, 7 – system analizy rozmiarowej cząstek SMPS, 8 – licznik optyczny OPS, 9 – jednostka akwizycyjna odbierająca i archiwizująca dane pomiarowe oraz program do analizy i wizualizacji danych, 10 – wentylator kanałowy, 11 – wielostopniowy układ filtracji powietrza (filtr wstępny, filtr HEPA), 12 – wentylator mieszający, 13 – wielostopniowy układ filtracji (filtr wstępny, filtr HEPA, filtr olejowy), 14 – zawór regulacyjny, 15 – przepływomierz, 16 – zespół dysz do pobierania próbek powietrza

Rys. 1. Stanowisko badania oczyszczaczy powietrza w warunkach laboratoryjnych
Fig. 1. Experimental setup for testing air purifiers in laboratory conditions

Stanowisko badawcze zostało opracowane w oparciu o dokumenty ANSI/AHAM AC-1-2020 [21] i AHAM AC-3-2009 (R2021) [22].

Stanowisko badawcze składa się z komory badawczej (1), instalacji elektrycznej, modułu przepływu powietrza, modułu filtracji powietrza, modułu regulacji parametrów powietrza, modułu generowania aerozoli testowych, modułu pomiaru stężenia cząstek aerozoli oraz jednostki odbioru i archiwizacji danych pomiarowych (9).

Pierwszym elementem stanowiska badawczego jest komora, która pozwala spełnić wymagania dotyczące uzyskania niskich stężeń cząstek aerozoli. W centralnej części komory umieszczony jest oczyszczacz powietrza (2).

Moduł przepływu powietrza recyrkulacyjnego wraz z modułem regulacji parametrów powietrza w komorze składa się z wentylatora kanałowego (10) i wielostopniowego układu filtracji powietrza, obejmującego filtr wstępny oraz filtr HEPA (11). Dodatkowo w komorze zastosowano wentylator mieszający powietrze podczas badań (12). Parametry powietrza, takie jak ciśnienie atmosferyczne, temperatura i wilgotność względna, w komorze badawczej są rejestrowane z użyciem termohigrobarometru LAB-EL z panelem LB 701 i sondą LB 725 (LAB-EL) (5).

Ważnymi elementami stanowiska badawczego są moduły generowania aerozoli testowych, pomiaru stężenia cząstek aerozoli oraz jednostka odbioru i archiwizacji danych pomiarowych. W celu wytworzenia aerozoli testowych do generatora SSPD Model 3433 Small-Scale Powder Disperser (TSI Inc.) (3) doprowadzane jest powietrze. Powietrze to jest oczyszczane w wielostopniowym układzie filtracji, obejmującym filtr wstępny, filtr HEPA i filtr olejowy (13). Strumień objętości powietrza jest regulowany przez zawór regulacyjny (14) i przepływomierz (15). Aerozol testowy jest generowany i uwalniany w komorze z użyciem zespołu rozpylaczy (4). Próbkę powietrza są pobierane w otoczeniu oczyszczacza powietrza przez układ dysz do pobierania próbek w sposób izokinetyczny (16).

Na stanowisku badawczym pomiar stężenia aerozoli testowych odbywa się z użyciem: – systemu analizy rozmiarowej cząstek SMPS 3082 + 3776 (TSI Inc.) do określenia stężenia liczbowego, masowego i powierzchniowego oraz rozkładu rozmiarowego dla 64 frakcji rozmiarowych cząstek w zakresie od 2 nm do 700 nm (7), przy zakresie stężeń od 0 do 300000 cząstek/cm³ i niepewności pomiaru 10%; – licznika optycznego OPS 3330 (TSI Inc.) do pomiaru stężenia liczbowego

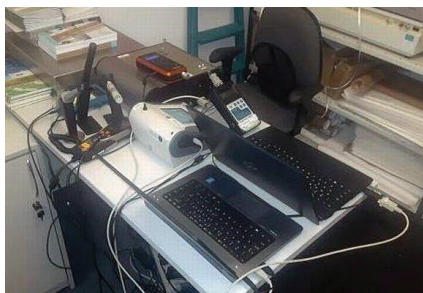
oraz rozkładu rozmiarowego w zakresie od 0,3 µm do 10 µm (8), z niepewnością pomiaru 5% dla rozmiaru cząstek 0,5 µm;

– spektrometru APS 3321 (TSI Inc.) do pomiaru średnicy aerodynamicznej cząstek w zakresie od 500 nm do 20 000 nm (6), z niepewnością pomiaru 0,02 µm dla cząstek 1,0 µm oraz 0,03 µm dla cząstek 10 µm.

Stanowisko badawcze jest wyposażone w jednostkę akwizycyjną odbierającą i archiwizującą dane pomiarowe oraz program do analizy i wizualizacji danych (9).

Stanowisko badawcze w warunkach użytkowania

Ocena skuteczności usuwania cząstek aerozoli przez oczyszczacz powietrza w warunkach użytkowania została oparta na monitoringu stężenia pyłów w powietrzu metodami licznikowymi oraz na monitoringu parametrów powietrza (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko badania oczyszczaczy powietrza w warunkach użytkowania

Fig. 2. Experimental setup for field testing air purifiers

W trakcie testów stosowano poniższą aparaturę pomiarową:

– Optyczny analizator rozmiaru cząstek 3330 (OPS, TSI Inc.) jest lekkim, przenośnym urządzeniem zapewniającym szybki i dokładny pomiar stężeń oraz rozkładu rozmiaru cząstek przy użyciu jednej techniki zliczania. Urządzenie pracuje w zakresie rozmiaru cząstek od 0,3 µm do 10 µm, w 16 kanałach, przy zakresie stężeń od 0 do 3000 cząstek/cm³ i niepewności pomiaru 5% dla rozmiaru cząstek 0,5 µm.

– Mini WRAS 1.371 (GRIMM GmbH) to spektrometr aerozoli o szerokim zakresie rozmiarowym cząstek, od 10 nm do 35 µm, w 41 kanałach rozmiarowych, obejmujących 10 kanałów z czujnika elektrycznego oraz 31 kanałów ze spektrometru aerozolu: 10, 14, 19, 27, 37, 52, 72, 100, 139, 193, 253, 298, 352, 414, 488, 576, 679, 800, 943, 1112, 1310, 1545, 1821, 2146, 2530, 2982, 3515, 4144, 4885, 5758, 6787, 8001, 9431, 11120, 13100, 15450, 18210, 21460, 25300, 29820 i 35150

nm. Niepewność pomiaru wynosi 40%, a minimalny czas skanowania wynosi 60 s.

– DiSCmini (Matter Aerosol/Testo) jest przenośnym sensorem do pomiaru liczby i rozmiaru cząstek, opartym na elektrycznym ładowaniu aerozoli, z rozdzielczością czasową do 1 sekundy (1 Hz). DiSCmini wykrywa cząstki w zakresie rozmiarów od 10 nm do 700 nm, przy czym wartości z zakresu od 10 nm do 300 nm mają największe prawdopodobieństwo wystąpienia w pobranej próbce powietrza, jako wartość modalna. Zakres badanych stężeń wynosi od około 10³ do ponad 10 cząstek/cm³. Niepewność pomiaru wynosi 20%.

– Termohigrobarometr LB 701 z panelem LB 701 i sondą LB 725 (LAB-EL) jest przeznaczony do pomiaru temperatury, od -40 do 85 °C, z niepewnością pomiaru 0,2 °C, wilgotności względnej powietrza, od 10 do 95%, z niepewnością pomiaru 2,0%, oraz ciśnienia atmosferycznego, od 700 do 1100 hPa, z niepewnością pomiaru 1,0 hPa.

– Q-Trak Plus 8554 (TSI Inc.) jest stosowany do badania parametrów powietrza, w tym stężenia tlenku węgla, od 0 do 500 ppm, i ditlenku węgla, od 0 do 5000 ppm, z niepewnością pomiaru 3%.

Obiekty badań

W warunkach laboratoryjnych badaniu poddano oczyszczacz powietrza „A”, dostarczony przez jednego z producentów. Urządzenie jest przeznaczone do oczyszczania i dezynfekcji powietrza w pomieszczeniach. Oczyszczacz składa się z filtrów powietrza, promienników UV-C, wentylatorów oraz układu sterowania. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry oczyszczacza powietrza „A”, określone przez producenta w karcie katalogowej.

Tabela 1. Dane techniczne oczyszczacza powietrza „A” określone przez producenta
Table 1. Air purifier „A” technical data specified by the manufacturer

Parametr	Wartość
Maks. kubatura oczyszczania wg producenta	225 m ³
Rodzaj filtrów	2x filtr wstępny G4 2x filtr wysokoskuteczny HEPA 12
Głośność pracy	40 dB
Pobór mocy	180 W
Wymiary	90,3 x 38,5 x 33,0 cm
Waga	20 kg

W badaniach w warunkach użytkownika zastosowano oczyszczacz powietrza „B”. Wybrane urządzenie było przeznaczone głównie do oczyszczania powietrza w pomieszczeniach typu biurowego. Oczyszczacz powietrza posiadał funkcje filtracji, nawilżania, chłodzenia i jonizacji powietrza. W tabeli 2 przedstawiono dane techniczne oczyszczacza powietrza „B”, określone przez producenta w karcie katalogowej.

Tabela 2. Dane techniczne oczyszczacza powietrza „B” określone przez producenta
Table 2. Air purifier “B” technical data specified by the manufacturer

Parametr	Wartość
Maks. powierzchnia oczyszczania wg producenta	103 m ²
Rodzaj filtrów	filtr wstępny G4 Filtr wysokoskutechny HEPA 13 Filtr węglowy
Głośność pracy	27-60 dB
Pobór mocy	110 W
Wymiary	65 x 48 x 28,5 cm
Waga	11,3 kg

W trakcie badań obydwa oczyszczacze powietrza pracowały w trybie automatycznych ustawień parametrów filtracji powietrza oraz wydajności przepływu powietrza.

Metodyka badawcza

Badania oczyszczacza powietrza „A” przeprowadzono dla aerozolu testowego generowanego w komorze, w warunkach laboratoryjnych, w dwóch etapach:

- pomiar naturalnego zaniku;
- pomiar z działającym oczyszczaczem powietrza.

Oczyszczacz powietrza „A” umieszczono na środku komory badawczej. Po etapie pomiaru stężenia tła, trwającym 15 minut, następował proces generowania aerozolu testowego przez 10 minut. Po wyłączeniu generatora aerozolu obserwowano spadek stężenia cząstek wewnątrz komory przez 20 minut. W trakcie pomiaru naturalnego zaniku oczyszczacz powietrza był wyłączony. Badanie zmiany stężenia aerozolu powtórzono również dla oczyszczacza powietrza włączonego w trybie automatycznym. Zmiany stężenia liczbowego w komorze badawczej określono dla cząstek o rozmiarach od 0,542 μm do 20 μm.

Badania weryfikacyjne w warunkach użytkownika oczyszczacza powietrza „B” przeprowadzono w pomieszczeniu typu biurowego, kancelarii. W pomieszczeniu o kubaturze około 80 m³ stale pracowały

trzy osoby, a dodatkowo kilkadziesiąt razy dziennie przychodzili interesanci. Badanie prowadzono przez 4 dni. Podczas pierwszego dnia eksperymentu zmierzono wartości tła, do których odniesiono wyniki pomiarów prowadzonych przez pozostałe trzy dni. Badania objęły pomiary stężeń pyłów zawieszonych PM10, PM2,5 i PM1 oraz stężenia liczbowego cząstek ultradrobnych, poniżej 700 nm. Urządzenia pomiarowe ustawiono na wysokości odpowiadającej strefie oddychania osoby siedzącej w pomieszczeniu. W trakcie badań oczyszczacz powietrza ustawiono w sąsiedztwie urządzeń pomiarowych i jednego ze stanowisk pracy. Oczyszczacz powietrza pracował w trybie automatycznym.

Pomiary prowadzono w trybie ciągłym przez 23 godziny na dobę, z uwzględnieniem godzinnej przerwy na bieżącą obsługę urządzeń oraz zgrywanie danych pomiarowych. Dwudziestotrzygodzinny okres rejestracji danych pomiarowych podzielono na trzy przedziały czasowe:

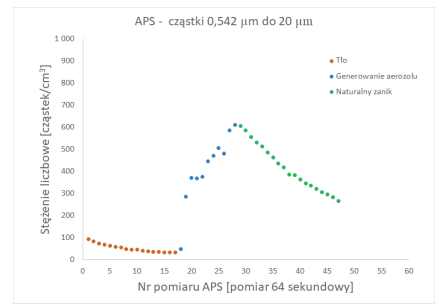
- od 9:00 do 16:00, czas pracy i wykonywania powtarzalnych czynności w badanym pomieszczeniu;
- od 16:00 do 17:00, pierwsza godzina po zakończeniu pracy;
- od 17:00 do 8:00, godziny nocne, bez wykonywania czynności przez pracowników.

Wyniki badań w trakcie oczyszczania powietrza zestawiono z wynikami pomiarów tła w pomieszczeniu. W trakcie prowadzonych badań mierzono także stężenie pyłu zawieszzonego PM10 na zewnątrz budynku. Badaniom towarzyszyła kontrola pozostałych parametrów jakości powietrza w pomieszczeniu, to jest temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza, ciśnienia atmosferycznego oraz stężenia CO₂ i CO.

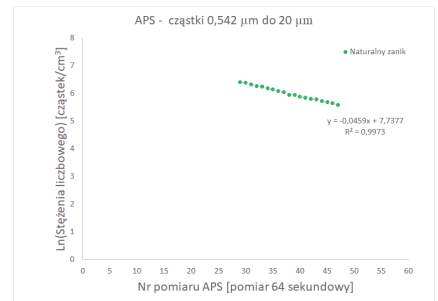
Omówienie wyników

Wyniki badania zmian stężenia liczbowego cząstek aerozolu testowego o określonym rozmiarze w komorze badawczej, w warunkach laboratoryjnych, przedstawiono odpowiednio dla naturalnego zaniku na rys. 3 i 4 oraz podczas usuwania cząstek pyłu przez oczyszczacz powietrza „A” na rys. 5 i 6. Stwierdzono zwiększony wpływ działania oczyszczacza powietrza na usuwanie cząstek pyłu w stosunku do naturalnego zaniku stężenia liczbowego cząstek.

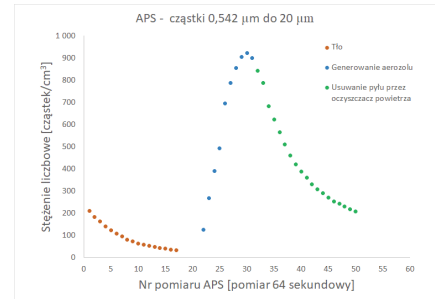
W tabeli 3 przedstawiono parametry użytkowe wyznaczone podczas badania oczyszczacza powietrza „A”, pracującego w trybie automatycznym, w komorze badawczej, w warunkach laboratoryjnych.



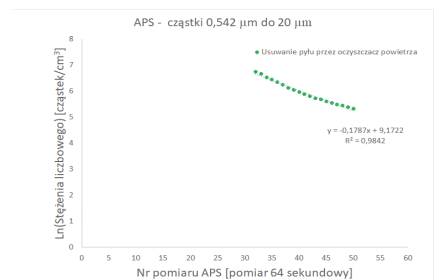
Rys. 3. Zmiany stężenia liczbowego cząstek o rozmiarach od 0,542 μm do 20 μm w komorze laboratoryjnej podczas naturalnego zaniku pyłu
Fig. 3. Changes in the number concentration of particles with sizes from 0.542 μm to 20 μm in a laboratory chamber with dust removal by natural decay



Rys. 4. Zmiany ln(stężenia liczbowego) cząstek o rozmiarach od 0,542 μm do 20 μm w komorze laboratoryjnej podczas naturalnego zaniku pyłu
Fig. 4. Changes in the ln(number concentration) of particles with sizes from 0.542 μm to 20 μm in a laboratory chamber with dust removal by natural decay



Rys. 5. Zmiany stężenia liczbowego cząstek o rozmiarach od 0,542 μm do 20 μm w komorze laboratoryjnej z usuwaniem pyłu przez oczyszczacz powietrza „A”
Fig. 5. Changes in the number concentration of particles with sizes from 0.542 μm to 20 μm in a laboratory chamber with dust removal by air purifier “A”



Rys. 6. Zmiany ln(stężenia liczbowego) cząstek o rozmiarach od 0,542 μm do 20 μm w komorze laboratoryjnej z usuwaniem pyłu przez oczyszczacz powietrza „A”
Fig. 6. Changes in the ln(number concentration) of particles with sizes from 0.542 μm to 20 μm in a laboratory chamber with dust removal by air purifier “A”

Tabela 3. Obliczone parametry użytkowe oczyszczacza powietrza „A”
Table 3. Calculated performance parameters of air purifier „A”

Parametr	Wartość
Stała szybkości usuwania cząstek pyłu przez oczyszczacz powietrza	0,1787
Odczylenie standardowe linii regresji	0,45 min ⁻¹
Wydajność oczyszczania powietrza (CADR)	227,1 m ³ /h
Wielkość pomieszczenia	21,1 m ²

Wyznaczony wskaźnik CADR wskazuje objętość powietrza wynoszącą 227 m³, która została przefiltrowana przez oczyszczacz powietrza „A” w ciągu 1 h. Stała wynosząca 0,1787 świadczy o szybkości usuwania cząstek pyłu w zakresie od 0,5 µm do 20 µm przez oczyszczacz powietrza „A”. Stała szybkości usuwania cząstek pyłu przez oczyszczacz powietrza „A” jest prawie czterokrotnie większa, przy niepewności pomiaru stężenia wynoszącej 10%, od naturalnego zaniku stężenia cząstek pyłu w komorze badawczej.

Wskaźnik CADR jest uważany za bardziej wiarygodny niż sama informacja o maksymalnym metrażu pomieszczenia, często podawana przez producentów oczyszczaczy powietrza. W badaniach stwierdzono, że im większy przepływ powietrza, określony wskaźnikiem CADR, w stosunku do metrażu pomieszczenia, tym wyższa stała szybkości usuwania zanieczyszczeń powietrza. Oznacza to, że stała szybkości jest proporcjonalna do wskaźnika CADR. Wyższy CADR oznacza szybsze tempo usuwania cząstek. Aby stała szybkości była jak najwyższa, konieczna jest wysoka wydajność oczyszczacza powietrza w stosunku do wielkości pomieszczenia oraz brak przeszkód wokół urządzenia.

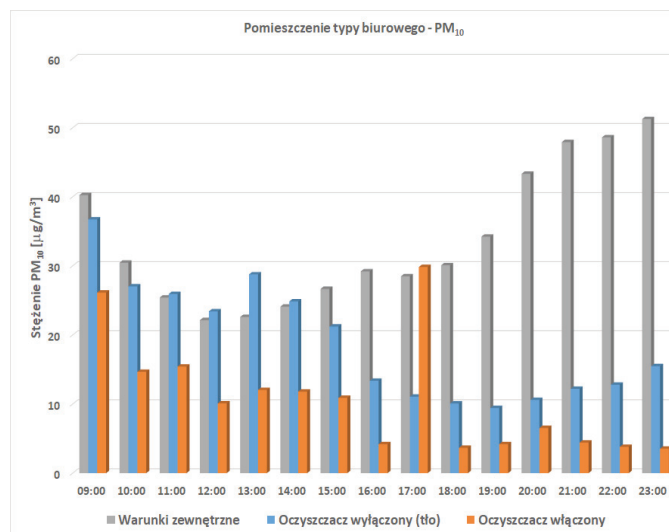
Podczas badań laboratoryjnych oczyszczacz umieszcza się zwykle w środku komory badawczej. Wentylator mieszający zapewnia jednolity rozkład zanieczyszczeń w pomieszczeniu testowym. Jeżeli oczyszczacz w pomieszczeniu jest ustawiony w sposób zakłócający przepływ powietrza albo obieg między zasileniem i powrotem jest krótki, jego rzeczywista wydajność może być niższa od wartości osiągniętej w warunkach laboratoryjnych.

Stąd dopełnieniem badań oczyszczaczy powietrza w warunkach laboratoryjnych są badania prowadzone w warunkach użytkowania pomieszczeń.

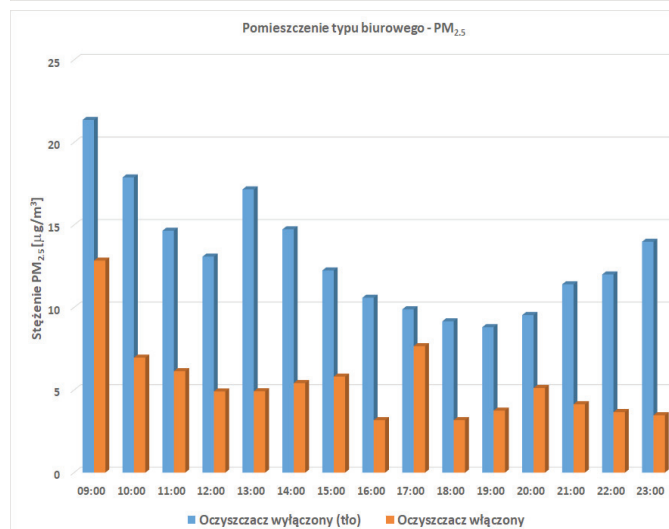
Wyniki badania zmian stężenia pyłu zawieszonego PM10, PM2,5 i PM1 oraz stężenia liczbowego cząstek ultradrobnych, poniżej 700 nm, w warunkach użytkowania pomieszczenia typu biurowego, kance-

larii, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 7, 8, 9 i 10. Średni rozkład rozmiarowy cząstek aerozolu emitowanych w pomieszczeniu typu biurowego, w warunkach użytkowania oczyszczacza powietrza „B”, pokazano na rys. 11. W wybranych przedziałach czasowych rejestracji danych pomiarowych zaobserwowano różne zmiany stężenia pyłu zawieszonego:

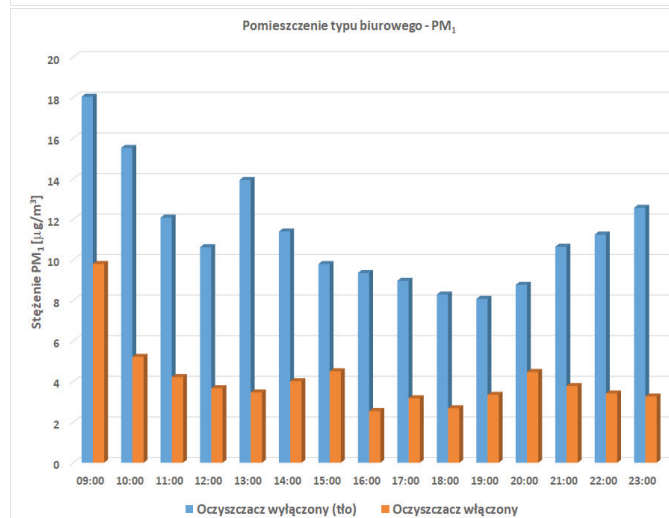
- od 9:00 do 16:00, czas chwilowych wzrostów stężenia pyłu zawieszonego, determinowanych głównie wykonywanymi czynnościami w pomieszczeniu;
- od 16:00 do 17:00, czas stabilizacji stężenia pyłu zawieszonego;
- od 17:00 do 8:00, czas zmian stężenia pyłu zawieszonego, determinowanych głównie warunkami zewnętrznymi.



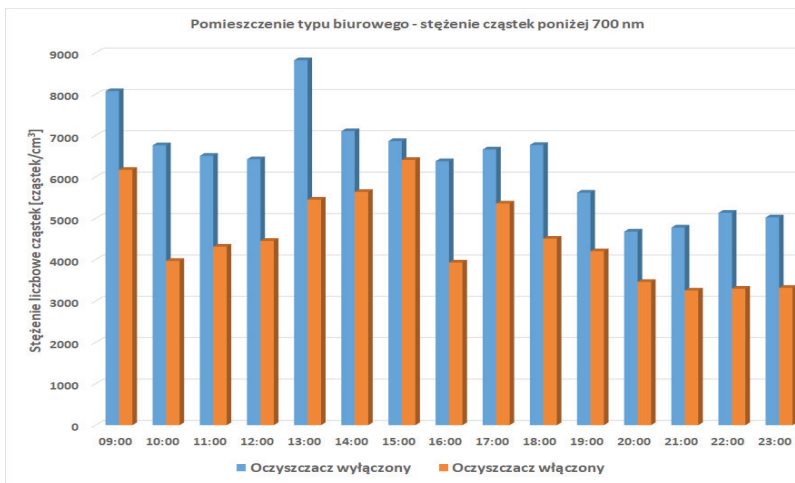
Rys. 7. Stężenie pyłu zawieszonego PM10 w pomieszczeniu
Fig. 7. Concentration of suspended PM10 dust in the room



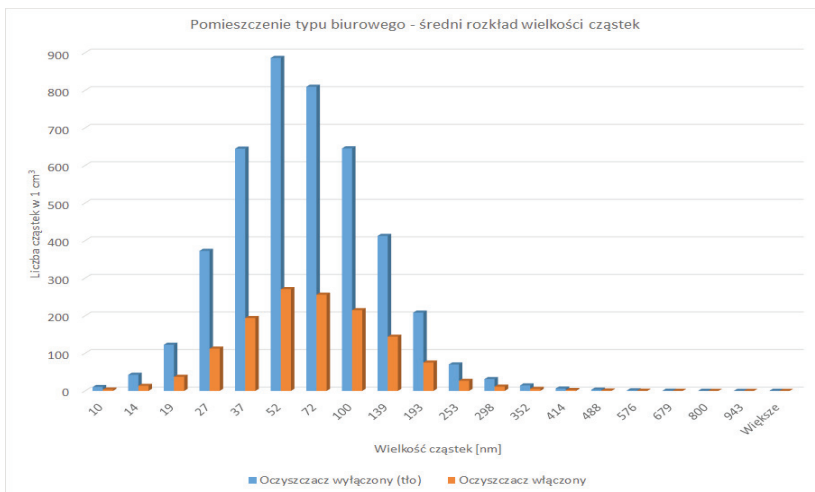
Rys. 8. Stężenie pyłu zawieszonego PM2,5 w pomieszczeniu
Fig. 8. Concentration of suspended PM2.5 dust in the room



Rys. 9. Stężenie pyłu zawieszonego PM1 w pomieszczeniu
Fig. 9. Concentration of suspended PM1 dust in the room



Rys. 10. Stężenie cząstek o rozmiarach mniejszych od 700 nm w pomieszczeniu
Fig. 10. Concentration of particles smaller than 700 nm in the room



Rys. 11. Średni rozkład rozmiarowy cząstek w pomieszczeniu
Fig. 11. Average particle size distribution in the room

Chwilowy wzrost stężenia pyłu w okolicy godziny 17:00 wynikał z czynności wykonywanych przez serwis sprzątający. Największy wpływ czynności tych obserwowano dla wzrostu frakcji PM10, czyli cząstek, które częściowo osiadły na powierzchniach w pomieszczeniu i zostały wtórnie wyemitowane do otoczenia. W większości przypadków po godzinie 18:00 stężenie pyłu zawieszonego zmieniło się już tylko nieznacznie, pod wpływem zmian warunków zewnętrznych.

Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że zastosowanie w wybranym pomieszczeniu oczyszczacza powietrza pracującego w trybie automatycznym umożliwiło obniżenie stężenia pyłu zawieszonego frakcji PM10 maksymalnie o 64%, frakcji PM2,5 maksymalnie o 59%, frakcji PM1 maksymalnie o 43% oraz stężenia cząstek mniejszych od 700 nm maksymalnie o 43% (tabela 4), w stosunku do warunków odniesienia, w których oczyszczacz był wyłączony. Niepewność pomiaru stężenia pyłu zawieszonego wynosiła 40%, natomiast cząstek ultradrobnych 20%.

Tabela 4. Redukcja cząstek pyłów przez oczyszczacz powietrza „B” w pomieszczeniu
Table 4. Reduction of dust particles by air purifier “B” in the room

Procentowa redukcja pyłów			
PM10	PM2,5	PM1	Poniżej 700 nm
43%	59%	64%	43%

Praca oczyszczacza powietrza nie spowodowała obniżenia stężenia ditlenku węgla CO₂ w badanych pomieszczeniach. W poszczególnych przedziałach czasowych osiągnięto następujące średnie wartości stężenia CO₂:

- oczyszczacz wyłączony, 926 ± 160 ppm (9:00 do 16:00) oraz 483 ± 78 ppm (17:00 do 8:00),
- oczyszczacz włączony, 895 ± 84 ppm (9:00 do 16:00) oraz 625 ± 81 ppm (17:00 do 8:00).

W trakcie badań nie stwierdzono obecności tlenku węgla CO powyżej granicy oznaczalności. Wyniki parametrów powietrza atmosferycznego podczas badania w pomieszczeniu typu biurowego przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry powietrza atmosferycznego podczas prowadzenia badań oczyszczacza powietrza „B” w pomieszczeniu
Table 5. Atmospheric air parameters during the research with air purifier “B” in the room

Parametr	Temperatura [°C]	Ciśnienie [hPa]	Wilgotność względna [%]
min	21,3	997,4	23,7
max	27,3	1014,0	41,1

Podsumowanie

Opracowana metoda oceny w warunkach laboratoryjnych umożliwia wyznaczenie wskaźnika CADR oraz podstawowych parametrów projektowych oczyszczaczy powietrza. Dopełnieniem tej metody jest stanowisko badawcze oczyszczaczy powietrza umożliwiające ocenę poprawy jakości powietrza w pomieszczeniach budynków. Zapewnia to producentom, dystrybutorom i użytkownikom oczyszczaczy powietrza dostęp do nowoczesnych metod badawczych zgodnych z kryteriami norm międzynarodowych.

Oczyszczacz powietrza można dobrać do określonej powierzchni lub kubatury pomieszczenia. Kryterium określone w warunkach kontrolowanych, wskaźnik CADR, dostarcza informacji o tym, po jakim czasie w założonej powierzchni lub kubaturze zanieczyszczenia powietrza zostaną usunięte. Jednak producenci lub dystrybutorzy często celowo nie podają informacji o wskaźniku CADR w danych technicznych oczyszczaczy powietrza. Dodatkowo urządzenia oczyszczające mogą mieć ograniczenia eksploatacyjne i nie osiągać projektowanych parametrów w warunkach rzeczywistego użytkowania. Z tego względu niezwykle istotny jest dostęp użytkowników do opracowanej metody badania oczyszczaczy powietrza w zmiennych warunkach środowiska wewnątrz budynków. Na skuteczność pracy oczyszczacza powietrza w określonym pomieszczeniu może wpływać system wentylacji i klimatyzacji stosowany w budynku. Oczyszczacz powietrza powinien wspierać usuwanie zanieczyszczeń przez mechaniczną wentylację ogólną. Na działanie oczyszczacza wpływają również intensywność i rodzaj czynności wykonywanych przez użytkowników, na przykład wzrost stężenia PM10 podczas czynności sprzątania. Znaczenie może mieć także pora dnia i nocy, czyli wzrost stężenia frakcji pyłu wywołany otwieraniem okien i drzwi w pomieszczeniu.

Finansowanie

Opracowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego

w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Zadanie 1.ZS.03, pt. „Ocena wskaźnika szybkości dostarczenia czystego powietrza przez przenośne oczyszczacze powietrza w warunkach laboratoryjnych”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Bibliografia

- [1] Chudzińska A., Smog: architektoniczne metody przeciwdziałania, „Builder”, 1(26), s. 28-31, 2022, DOI: 10.5604/01.3001.0015.5969.
- [2] Adamkiewicz Ł.; Kryza M.; Mucha D.; Werner, M.; Gayer, A.; Drzeniecka-Osiadacz A.; Sawiński T. Estimating Health Impacts Due to the Reduction of Particulate Air Pollution from the Household Sector Expected under Various Scenarios. Appl. Sci. 2021, 11, 272. <https://doi.org/10.3390/app11010272>
- [3] Afshari A., Mo J., Tian E., Seppänen O., Testing Portable Air Cleaning Units: Test Methods and Standards. A Critical Review, „REHVA Journal”, 59(3), s. 35-46, 2022.
- [4] J. Niu, T.C.W. Tung, V.W.Y. Chui, Using large environmental chamber technique for gaseous contaminant removal equipment test/discussion, ASHRAE Trans. 104 (1998) 1289.
- [5] W.W. Nazaroff, Effectiveness of air cleaning technologies, in: Healthy Buildings, Helsinki, 2000: pp. 49–54.
- [6] S. Miller-Leiden, C. Lohascio, W.W. Nazaroff, J.M. Macher, Effectiveness of In-room air filtration and dilution ventilation for tuberculosis infection control, J Air Waste Manage Assoc 46 (1996), <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467523>.
- [7] J.A. Siegel, Primary and secondary consequences of indoor air cleaners, Indoor. Air. 26 (2016), <https://doi.org/10.1111/ina.12194>.
- [8] National Standard of the People's Republic of China, Air Cleaner (GB/T 18801-2015), 2015. https://gbstandards.org/GB_standard_english.asp?code=GB/T%2018801-2015 (accessed March 31, 2024).
- [9] Z.M. Sultan, G.M. Nilsson, R.J. Magee, J.S. Bradley, Method for testing portable air cleaners, 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.4224/20374076>.
- [10] J. Pei, W. Dai, H. Li, J. Liu, Laboratory and field investigation of portable air cleaners' long-term performance for particle removal to be published in: building and environment, Build. Environ. 181 (2020) 107100, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107100>.
- [11] J.H. Lee, M. Rounds, F. McGain, R. Schofield, G. Skidmore, I. Wadlow, K. Kevin, A. Stevens, C. Marshall, L. Irving, M. Kainer, K. Busing, J. Monty, Effectiveness of portable air filtration on reducing indoor aerosol transmission: preclinical observational trials, J. Hospit. Infect. 119 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.09.012>.
- [12] F.T. Lu, R.J. Laumbach, A. Legard, N.T. Myers, K.G. Black, P. Ohman-Strickland, S. Alimoktari, A. de Resende, L. Calderón, G. Mainelis, H.M. Kipen, Real-world effectiveness of portable air cleaners in reducing home particulate matter concentrations, „Aerosol and Air Quality Research”, 24, 2024, 230202, <https://doi.org/10.4209/aaqr.230202>.
- [13] J. Cox, K. Isiugo, P. Ryan, S.A. Grinshpun, M. Yermakov, C. Desmond, R. Jandarov, S. Vesper, J. Ross, S. Chillrud, K. Dannemiller, T. Reponen, Effectiveness of a portable air cleaner in removing aerosol particles in homes close to highways, Indoor. Air. 28 (2018), <https://doi.org/10.1111/ina.12502>.
- [14] A. Wheeler, F. Reisen, C. Roulston, M. Dennekamp, N. Goodman, F. Johnston, Evaluating portable air cleaner effectiveness in residential settings to reduce exposures to biomass smoke resulting from prescribed burns, Public Health Res. Pract. 34 (2024), <https://doi.org/10.17061/phrp33232307>.
- [15] P. Barn, T. Larson, M. Noullett, S. Kennedy, R. Copes, M. Brauer, Infiltration of forest fire and residential wood smoke: an evaluation of air cleaner effectiveness, J. Expo Sci. Environ. Epidemiol. 18 (2008) 503–511, <https://doi.org/10.1038/sj.ies.7500640>.
- [16] G. Cortellessa, C. Canale, L. Stabile, G. Grossi, G. Buonanno, F. Arpino, Effectiveness of a portable personal air cleaner in reducing the airborne transmission of respiratory pathogens, Build. Environ. 235 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110222>.
- [17] Z. Li, X. Ma, Y. Liao, Combined performance of upper-room UVGI and ceiling-mounted air cleaners for removing active bioaerosol, Build. Environ. 267 (2025) 112230, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112230>.
- [18] [18] B. Mølgaard, A.J. Koivisto, T. Hussein, K. Hameri, A new clean air delivery rate test applied to five portable indoor air cleaners, „Aerosol Science and Technology”, 48, 2014, <https://doi.org/10.1080/02786826.2014.883063>.
- [19] X. Zhu, M. Lv, X. Yang, A test-based method for estimating the service life of adsorptive portable air cleaners in removing indoor formaldehyde, Build. Environ. 154 (2019) 89–96, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.018>.
- [20] H.-J. Kim, B. Han, Y.-J. Kim, Y.-H. Yoon, T. Oda, Efficient test method for evaluating gas removal performance of room air cleaners using FTIR measurement and CADR calculation, Build. Environ. 47 (2012) 385–393, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.024>.
- [21] ANSI/AHAM AC-1-2020. Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners.
- [22] AHAM AC-3-2009 (R2021) Method for Measuring the Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners Following Accelerated Particulate Loading, 2009.
- [23] PN-EN IEC 63086-1:2021-01/A1:2024-04. Elektryczne urządzenia do oczyszczania powietrza do użytku domowego i podobnego -- Metody badań cech funkcjonalnych -- Część 1: Wymagania ogólne.
- [24] PN-EN IEC 63086-2-1:2024-10. Elektryczne urządzenia do oczyszczania powietrza do użytku domowego i podobnego -- Metody badań cech funkcjonalnych -- Część 2-1: Wymagania szczegółowe dotyczące pomiaru redukcji cząstek stałych.
- [25] Jankowski T. Metody oczyszczania powietrza w pomieszczeniach budynków. Inżynier Budownictwa, 2(235), 76-80, 2025.

