

Tomasz Jankowski

Metody oceny jakości filtrów powietrza stosowanych w instalacjach wentylacyjno-klimatyzacyjnych budynków

ZALECENIA



Tomasz Jankowski

**Metody oceny jakości filtrów powietrza
stosowanych w instalacjach
wentylacyjno-klimatyzacyjnych budynków**
ZALECENIA

CIOP  PIB

Warszawa 2022

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej.

Zadanie 2.SP.14, pt. „Opracowanie metodyki oceny jakości wysokoskutekcyjnych filtrów powietrza z uwzględnieniem nowych wymagań norm międzynarodowych”.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autor: dr inż. Tomasz Jankowski – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt okładki: Jolanta Maj

Opracowanie redakcyjne: Monika Piech-Rzymowska

Opracowanie graficzne: Dorota Marzec

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy

– Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa 2022

ISBN 978-83-7373-394-7



Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (22) 623 36 98, fax (22) 623 36 93, 623 36 95, www.ciop.pl

Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Jakość powietrza wewnątrz budynków.....	7
3. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z normami międzynarodowymi.....	8
4. Kompetencje Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego w zakresie klasyfikowania i badania filtrów powietrza.....	15
5. Model wskaźnika jakości filtra powietrza.....	20
Bibliografia	23

1. WPROWADZENIE

Aerozole, w tym pyły stanowią jeden z głównych czynników szkodliwych występujących w środowisku pracy. Działanie pyłu na organizm ludzki może być przyczyną mechanicznego uszkodzenia błon śluzowych lub skóry, choroby uczuleniowej, pylicy płuc, a także choroby nowotworowej.

W warunkach rzeczywistych użytkowania pomieszczeń i prowadzenia procesów technologicznych nadrzędnym celem jest zapewnienie ochrony użytkownikom pomieszczeń pracy przed ryzykiem związanym z narażeniem na cząstki aerozoli. Zmniejszenie ryzyka zagrożenia chorobami zawodowymi, wynikającymi z narażenia na aerozole jest zatem jednym z ważniejszych zagadnień związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa pracy.

Ryzyko zawodowe związane z pracą z substancjami chemicznymi i ich mieszaninami stwarzającymi zagrożenie należy eliminować lub ograniczać do minimum zgodnie z ogólnymi przepisami bezpieczeństwa i higieny pracy. Europejskie prawodawstwo dotyczące ochrony pracowników wprowadziło hierarchię działań, które pracodawcy powinni realizować w celu profilaktyki zagrożeń wynikających ze stosowania substancji/ mieszanin chemicznych.

Hierarchię środków zapobiegawczych określa się jako **STOP**:



Substitution (Zastępowanie)

Technological measures (Środki techniczne)

Organisational measures (Środki organizacyjne)

Personal protection (Ochrona indywidualna)

Ochrona pracowników przed szkodliwym działaniem aerozoli wymaga:

- ➔ określenia rodzaju, stężenia i innych podstawowych parametrów aerozoli emitowanych do pomieszczenia pracy,
- ➔ dokonania oceny narażenia pracowników na szkodliwe działanie aerozoli występujących w środowisku pracy,
- ➔ przeprowadzenia oceny ryzyka zawodowego pracowników narażonych na szkodliwe działanie aerozoli występujących w środowisku pracy,
- ➔ zastosowania odpowiednich środków profilaktyki organizacyjnej i technicznej, w tym środków ochrony zbiorowej przed aerozolami

umożliwiających eliminację zanieczyszczeń powietrza ze środowiska pracy, a jeżeli nie jest to możliwe zastosowanie odpowiednich środków ochrony indywidualnej.

ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ AEROZOLI EMITOWANYCH NA STANOWISKACH PRACY MOŻNA OGRANICZAĆ, WYKORZYSTUJĄC RÓŻNE TYPY ŚRODKÓW OCHRONY ZBIOROWEJ PRZED AEROZOLAMI, KTÓRYCH STOSOWANIE – ZGODNIE Z DYREKTYWAMI UE I PRAWEM POLSKIM – JEST PRIORYTETEM W STOSUNKU DO STOSOWANIA ŚRODKÓW OCHRONY INDYWIDUALNEJ.

Środki ochrony zbiorowej przed aerozolami to przede wszystkim instalacje wentylacji mechanicznej ogólnej oraz urządzenia wentylacji mechanicznej miejscowej. Ochrona przed działaniem aerozoli na stanowiskach pracy powinna odbywać się przede wszystkim z wykorzystaniem różnych typów środków ochrony zbiorowej:

- ➔ wentylacji,
- ➔ **filtracji powietrza.**

Zarówno w instalacjach wentylacji ogólnej, jak i w urządzeniach wentylacji miejscowej elementami decydującymi o jakości powietrza odprowadzanego lub doprowadzanego do pomieszczeń są układy oczyszczające jedno- lub wielostopniowe, zdeterminowane wymaganiami higienicznymi lub technologicznymi.

Materiały filtracyjne i filtry powietrza są stosowane zwykle jako ostatni etap procesu oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń aerozolami. Układy te mają rozbudowaną strukturę w przekroju poprzecznym i cząstki aerozoli mogą być zatrzymywane na włóknach wewnątrz tej struktury. Jednym z najważniejszych zjawisk decydujących o optymalnych właściwościach filtracyjnych takich układów jest oddziaływanie cząstek aerozoli z włóknami stanowiącymi warstwę filtracyjną. Podstawowymi parametrami opisującymi pracę układu włóknin są opory przepływu i sprawność frakcyjna określane podczas przebiegu nieustalonej filtracji wgłębnej, charakteryzowanej przez złożone mechanizmy transportu i zatrzymywania cząstek aerozoli [1-4].

Ocena działania materiałów filtracyjnych i filtrów powietrza w instalacjach wentylacji ogólnej, jak również w urządzeniach wentylacji miejscowej może być dodatkowo wspomagana przez odpowiednie wskaźniki jakości.

2. JAKOŚĆ POWIETRZA WEWNĄTRZ BUDYNKÓW

Zgodnie z dyrektywą Unii Europejskiej 2010/31/WE z dnia 19 maja 2010 r. zmienioną przez dyrektywę 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków – wszystkie budynki wybudowane po 31 grudnia 2020 r. muszą spełniać wysokie standardy energooszczędności [5].

Budynki muszą charakteryzować się niemal zerowym zużyciem energii, stąd istnieje ryzyko, że dążenie do energooszczędności może wpłynąć negatywnie na jakość powietrza i klimat wewnętrzny w pomieszczeniach. Szczególne znaczenie mają prace dotyczące optymalizacji działania i racjonalnego wykorzystywania systemów filtracji, wentylacji i klimatyzacji powietrza wewnątrz budynków.

Człowiek spędzający czas wewnątrz i na zewnątrz budynków na terenach zurbanizowanych, ale również podczas przemieszczania się pojazdami (komunikacja indywidualna i zbiorowa) jest narażony na wdychanie substancji chemicznych w postaci par i gazów oraz pyłów zawieszonych: PM10, PM2.5 i PM1 w powietrzu atmosferycznym. Niekorzystne warunki wewnątrz budynków mogą skutkować poważnymi dolegliwościami zdrowotnymi u człowieka, przejawiającymi się **Syndromem Chorego Budynku** (Sick Building Syndrome – SBS).

Podejmowanie działań zmierzających do eliminowania zagrożenia zanieczyszczeniami powietrza w środowisku pracy człowieka jest zdefiniowane wymaganiami: rozporządzenia Parlamentu i Rady UE 2016/425 [6], dyrektyw Unii Europejskiej (89/391/EWG, 98/24/WE) [7-8], konwencji nr 148 Międzynarodowej Organizacji Pracy [9] oraz rozporządzeniami ministerialnymi z lat: 1997, 2002, 2022 [10-13].

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniach, w szczególności na terenach zurbanizowanych, jest wymagane prawidłowe oczyszczanie powietrza na filtrach powietrza w centralach wentylacyjno-klimatyzacyjnych budynków.

3. KLASYFIKACJA FILTRÓW POWIETRZA ZGODNIE Z NORMAMI MIĘDZYNARODOWYMI

Materiały filtracyjne i filtry powietrza są ważnymi elementami środków ochrony zbiorowej przed aerozolami. Zarówno w instalacjach wentylacji ogólnej, jak i w urządzeniach filtracyjno-wentylacyjnych elementami decydującymi o jakości powietrza odprowadzanego z pomieszczeń lub do nich doprowadzanego są układy filtracyjne jedno- lub wielostopniowe, zdeterminowane wymaganiami higienicznymi lub technologicznymi.

W zależności od wymaganego stopnia czystości powietrza doprowadzanego lub odprowadzanego z pomieszczeń przez instalacje wentylacyjne stosowane są różne układy filtracyjne, projektowane na podstawie danych o parametrach użytkowych filtrów powietrza określonych podczas badań znormalizowanymi metodami stosowanymi do ich klasyfikacji.

Wymagania dotyczące metod badania i zasad klasyfikacji filtrów powietrza stosowanych do instalacji wentylacji i klimatyzacji zostały określone w normach międzynarodowych.

Zgodnie z normami PN-EN 1822:2009 [14-18] i PN-EN 779:2012 [19], przyjętymi w Polsce przez Komitet Techniczny nr 317 PKN ds. Wentylacji i Klimatyzacji i ustanowionymi w ramach prac Komitetu Technicznego TC 195 Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN), filtry powietrza ze względu na klasy dzieli się na:

- ➔ wstępne typu G, pośrednie typu M, dokładne typu F,
- ➔ wysokoskuteczne typu Efficient Particulate Air filter (EPA),

High Efficient Particulate Air filter (HEPA) i typu Ultra Low Penetration Air filter (ULPA).

Klasyfikacja filtrów powietrza typu G, M i F, zgodna z normą PN-EN 779:2012, została przedstawiona w tabeli 1. Filtry typu G, M i F są klasyfikowane na podstawie ich średniej sprawności filtracji, określonej testem pyłu syntetycznego i testem aerozolu o wymiarach cząstek 0,4 μm .

Filtry wstępne typu G są przede wszystkim stosowane w instalacjach wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń o przeciętnych wymaganiach czystości powietrza oraz jako filtry wstępne przed filtrami o wyższej skuteczności w centralach wentylacyjno-klimatyzacyjnych pomieszczeń o wysokich wymaganiach czystości powietrza.

Tabela 1. Klasyfikacja wstępnych i dokładnych filtrów powietrza zgodnie z PN-EN 779:2012

Klasa filtrów	Końcowy opór przepływu, Pa	Średnia skuteczność określona testem pyłu ASHRAE 52.1, %	Średnia skuteczność w odniesieniu do cząstek o wymiarach 0,4 μm	Minimalna skuteczność w odniesieniu do cząstek o wymiarach 0,4 μm
			Test aerozolem cieczy DEHS – ester bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego, %	
G1	250	$50 \leq A_m < 65$	–	–
G2	250	$65 \leq A_m < 80$	–	–
G3	250	$80 \leq A_m < 90$	–	–
G4	250	$90 \leq A_m$	–	–
M5	450	–	$40 \leq E_m < 60$	–
M6	450	–	$60 \leq E_m < 80$	–
F7	450	–	$80 \leq E_m < 90$	35
F8	450	–	$90 \leq E_m < 95$	55
F9	450	–	$95 \leq E_m$	70

Filtry dokładne typu M i F znajdują zastosowanie w systemach wentylacji pomieszczeń o wysokich wymaganiach czystości powietrza oraz jako filtry wstępne w instalacjach wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń o bardzo wysokich wymaganiach czystości powietrza przed filtrami wysokoskutecznymi.

Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) przygotowała serię nowych norm dotyczących badania i klasyfikowania filtrów powietrza stosowanych w wentylacji ogólnej. W 2017 roku normy: PN-EN ISO 16890-1:2017, PN-EN ISO 16890-2:2017, PN-EN ISO 16890-3:2017, PN-EN ISO 16890-4:2017 [20-23] zostały wprowadzone w Polsce przez Komitet Techniczny nr 317 PKN ds. Wentylacji i Klimatyzacji.

Wdrożenie serii norm PN-EN ISO 16890:2017 spowodowało wycofanie normy PN-EN 779:2012. W związku z potrzebą dostosowania aerozolu testowego do rzeczywistego aerozolu atmosferycznego oraz z uwagi na skutki zdrowotne związane z wdychaniem przez człowieka zanieczyszczonego powietrza, w normach zamieszczono nowy sposób testowania filtrów powietrza. Odniesiono go do trzech różnych zakresów wymiarów cząstek pyłu zawieszonego (ang. *particulate matter* – PM):

- ➔ PM_{10} w przypadku cząstek o wymiarach od 0,3 do 10 μm ,
- ➔ $PM_{2,5}$ w przypadku cząstek o wymiarach od 0,3 do 2,5 μm ,
- ➔ PM_1 w przypadku cząstek o wymiarach od 0,3 do 1 μm .

Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z normą **PN-EN ISO 16890-1:2017** przedstawiona została w tabeli 2. Filtry powietrza są klasyfikowane na podstawie ich początkowego, grawimetrycznego zatrzymania, skuteczności filtracji ePM_{10} , $ePM_{2,5}$, ePM_1 oraz minimalnej skuteczności $ePM_{1,min}$ i $ePM_{2,5,min}$. Filtr o niskiej skuteczności filtracji uzyskanej w wyniku testu zatrzymania pyłu syntetycznego L2 o składzie zgodnym z PN-ISO 15957:2015 [24] nie zostaje nadana klasa ePM_x .

Tabela 2. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z PN-EN ISO 16890-1:2017

Oznaczenie grupy filtrów	Wymagania			Wartość odniesienia do klasy filtra
	$ePM_{1,min}$	$ePM_{2,5,min}$	ePM_{10}	
ISO coarse	–	–	< 50%	początkowe, grawimetryczne zatrzymanie
ISO ePM_{10}	–	–	$\geq 50\%$	ePM_{10}
ISO $ePM_{2,5}$	–	$\geq 50\%$		$ePM_{2,5}$
ISO ePM_1	$\geq 50\%$	-		ePM_1

Dotychczas stosowana klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza do wentylacji ogólnej była przedstawiona w serii PN-EN 1822. Jej ostatnie wydanie ukazało się w 2009 roku.

Pod koniec 2018 roku zostały opublikowane w Polsce (KT nr 317 PKN) i Europie (CEN/TC 195/WG 2) nowe normy ISO 29463-1 [25] oraz PN-EN ISO 29463-2, PN-EN ISO 29463-3, PN-EN ISO 29463-4, PN-EN ISO 29463-5 [26-29]. Pierwsza część podaje klasyfikację, własności użytkowe, znakowanie filtrów, a pozostałe części od 2 do 5 to normy wykonawcze, opisujące poszczególne procedury badawcze w zakresie: wytwarzania aerozolu, aparatury pomiarowej i obliczeń statystycznych (część 2), badania płaskich próbek materiału (część 3), badania przecieku filtrów (część 4), badania skuteczności filtracji filtrów (część 5).

Części od 2 do 5 tej normy zostały przyjęte jako normy europejskie i polskie jako PN-EN ISO 29463 i formalnie obowiązują od kwietnia

2019 roku. Przyjęto je tym samym do stosowania bez zmian. Jednak europejscy członkowie ISO w miejsce części pierwszej ISO 29463-1 przyjęli jako obowiązującą do stosowania na terenie Europy normę EN 1822-1:2019 [30], która zastępuje normę EN 1822-1:2009 [31].

PN-EN 1822-1:2009 została wycofana 17 maja 2019 roku, jednak zgodnie z decyzją CEN była aktualna w ocenie zgodności do 31 października 2019 roku. Natomiast od 31 października 2019 roku obowiązują dwie serie norm – PN-EN 1822-1:2019 [32] oraz PN-EN ISO 29463-2,3,4,5:2018.

Norma PN-EN 1822-1:2019 wprowadza zmiany w stosunku do **EN ISO 29463-1**. Wszędzie tam, gdzie w normie PN-EN ISO 29463, w częściach od 2 do 5 wymienia się normę EN ISO 29463-1, należy stosować normę PN-EN 1822-1:2019. Odnośnie klasyfikacji i znakowania filtrów, to utrzymuje się poprzednią klasyfikację i znakowanie, tj. klasy od E10 do U17 (zamiast klas ISO 15E do ISO 75U). Metodyka badań nie ulega zmianom w stosunku do norm: PN-EN 1822-2:2009, PN-EN 1822-3:2009, PN-EN 1822-4:2009 oraz PN-EN 1822-5:2009. Występują natomiast następujące różnice w zakresie stosowania:

- ➔ norma ISO dopuszcza stosowanie fotometru do badania przecieku filtrów, a norma EN – nie dopuszcza,
- ➔ norma ISO wymaga badania skuteczności każdego egzemplarza filtru od klasy ISO 35H (H13) wzwyż; norma EN dopuszcza badania filtrów HEPA klas H13 i H14 na zasadach statystycznych, o ile badanie przecieku wykonuje się dla każdego egzemplarza według PN-EN ISO 29463-4:2018, Aneks A.

Konsekwentnie norma EN uznaje możliwość stosowania tej metody równorzędnie z metodą skanowania, podczas gdy norma ISO wymaga tu porozumienia z odbiorcą. Pewną nowością w stosunku do poprzedniej normy, PN-EN 1822:2009, w zakresie badania skuteczności filtrów jest wyróżnienie metody z użyciem sondy stacjonarnej: norma PN-EN ISO 29463-5:2018 podaje ją jako metodę referencyjną, a metodę skanowania umieszcza jako alternatywną w aneksie A.

Klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza typu: EPA, HEPA i ULPA, zgodna z normą **PN-EN 1822-1:2019**, została przedstawiona w tabeli 3. Klasa filtru jest określana na podstawie wartości całkowitych i miejscowych skuteczności oraz penetracji filtracji. Filtry wysokoskuteczne są stosowane jako ostatni stopień w warstwowych kompozytach włóknin systemów wentylacji w pomieszczeniach o bardzo wysokich wymaganiach czystości powietrza. Skuteczność

całkowita określana w odniesieniu do filtrów typu E, H i U to skuteczność uśredniona w stosunku do całej powierzchni czołowej filtra w danych warunkach eksploatacyjnych. Natomiast skuteczność miejscowa jest skutecznością w określonym punkcie filtra, w danych warunkach eksploatacyjnych. Badanie skuteczności i penetracji filtracji przez filtry wysokoskuteczne wykonuje się testem aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego (DEHS) lub testem aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu ftalowego (DOP).

Tabela 3. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z PN-EN 1822-1:2019

Klasa filtra	Wartość całkowita		Wartość miejscowa	
	Skuteczność, %	Penetracja, %	Skuteczność, %	Penetracja, %
E10	≥ 85	≤ 15	–	–
E11	≥ 95	≤ 5	–	–
E12	≥ 99,5	≤ 0,5	–	–
H13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
H14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
U16	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
U17	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

Klasyfikację wysokoskutecznych filtrów powietrza zgodnie z zgodnie z EN ISO 29463-1:2017 przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z ISO 29463-1:2017

Klasa filtra	Wartość całkowita		Wartość miejscowa	
	Skuteczność, %	Penetracja, %	Skuteczność, %	Penetracja, %
ISO 15E	≥ 95	≤ 5	–	–
ISO 20E	≥ 99	≤ 1	–	–
ISO 25E	≥ 99,5	≤ 0,5	–	–
ISO 30E	≥ 99,9	≤ 0,1	–	–
ISO 35H	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25

ISO 40H	≥ 99,99	≤ 0,01	≥ 99,95	≤ 0,05
ISO 45H	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
ISO 50H	≥ 99,999	≤ 0,001	≥ 99,995	≤ 0,005
ISO 55U	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
ISO 60U	≥ 99,9999	≤ 0,0001	≥ 99,9995	≤ 0,0005
ISO 65U	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
ISO 70U	≥ 99,99999	≤ 0,00001	≥ 99,9999	≤ 0,0001
ISO 75U	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

Wysokoskuteczne filtry powietrza EPA (klasy E10-E12), HEPA (klasy H13-H14) i ULPA (klasy U15-U17) są stosowane jako ostatni stopień filtracji w instalacjach wentylacji pomieszczeń czystych o klasach czystości wyższych niż ISO 7 (np. sterylne sale operacyjne, produkcja leków i surowic, produkcja taśm filmowych i magnetycznych, pomieszczenia produkcji mikroelektroniki). W przypadku bardzo wysokich wymagań stawianych czystości powietrza są wykorzystywane wielostopniowe układy filtracyjne.

Klasyfikację czystości powietrza pod względem stężenia cząstek stałych w powietrzu pomieszczeń czystych, stref czystych i urządzeń oddzielających wg PN-EN ISO 14644-1:2016 [33] przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Klasy czystości pomieszczeń wg PN-EN ISO 14644-1:2016

Numer klasy ISO (N)	Maksymalne, dopuszczalne stężenie (cząstki/m ³ powietrza) dla cząstek pyłu o wielkości równej podanym poniżej lub większej od nich					
	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
ISO 1	10	2	–	–	–	–
ISO 2	100	24	10	4	–	–
ISO 3	1000	237	102	35	8	–
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	–
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7	–	–	–	352 000	83 200	2 930
ISO 8	–	–	–	3 520 000	832 000	29 300
ISO 9	–	–	–	35 200 000	8 320 000	293 000

Rozdział przepływu powietrza w pomieszczeniu czystym można sklasyfikować jako (wg PN-EN ISO 14644-4:2006) [34]:

- ➔ jednokierunkowy przepływ powietrza – kontrolowany przepływ powietrza przez cały przekrój strefy czystej, o stałej prędkości i w przybliżeniu równoległych liniach prądu,
- ➔ wielokierunkowy przepływ powietrza – powietrze nawiewane do strefy czystej miesza się z powietrzem wewnętrznym na drodze indukcji.

Jeśli jest wykorzystywany rodzaj przepływu, będący połączeniem powyższych, mamy układ mieszany. W przypadku pomieszczeń czystych o klasie ISO 5 i wyżej na etapie rutynowego użytkowania stosuje się zwykle jednokierunkowy rozdział przepływu powietrza. Wielokierunkowy rozkład przepływu powietrza i rozkład mieszany jest wykorzystywany w pomieszczeniach o klasie czystości ISO 6 i niższej (PN-EN ISO 14644-4:2006).

Dodatковым badaniem, któremu powinno się poddać materiały filtracyjne stosowane w instalacjach wentylacyjnych podczas obróbki nanomateriałów, są pomiary stężenia nanoaerozolu zgodnie z wytycznymi normy **PN-EN ISO 21083-1:2019** [35].

4. KOMPETENCJE CENTRALNEGO INSTYTUTU OCHRONY PRACY – PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU BADAWCZEGO W ZAKRESIE KLASYFIKOWANIA I BADANIA FILTRÓW POWIETRZA

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

- ➔ filtrów powietrza,
 - ➔ materiałów filtracyjnych,
- które są stosowane w:
- ➔ instalacjach ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) budynków,
 - ➔ instalacjach wentylacyjnych w procesach technologicznych.

W laboratoriach CIOP-PIB przeprowadza się badania skuteczności wstępnych (tabela 6) i dokładnych (tabela 7) filtrów powietrza w odniesieniu do elektrycznie neutralizowanych stałych cząstek chlorku potasu (KCl) oraz pyłu testowego A2 zgodny ISO 12103-1:2016 [36] (rys. 1).



Rys. 1. Stanowisko do badania parametrów filtrów powietrza zgodnie z **PN-EN ISO 16890**

Tabela 6. Parametry klasyfikacyjne wstępnego filtra powietrza (PN-EN ISO 16890)

Początkowe opory przepływu, Pa: 49	Początkowe zatrzymanie pyłu: 67,44%	ePM1, min 4,08%	ePM2,5, min 7,51%	Klasyfikacja ISO ISO Coarse 65%
Końcowe opory przepływu, Pa: 200	Chłonność pyłowa: 2725,00 g	ePM ₁ 3,38%	ePM _{2,5} 7,34%	ePM ₁₀ 24,49%
				<p>E_i – początkowa skuteczność frakcyjna (ISO 16890-2) E_{D,i} – skuteczność frakcyjna po kondycjonowaniu (ISO 16890-4) E_{A,i} – średnia skuteczność frakcyjna (ISO 16890-1)</p>
				<p>Δp_i – początkowe opory przepływu w funkcji natężenia przepływu powietrza (ISO 16890-3)</p>

Tabela 7. Parametry klasyfikacyjne dokładnego filtra powietrza (PN-EN ISO 16890)

Początkowe opory przepływu, Pa: 100	ePM1, min 31,37%	ePM2,5, min 44,08%	Klasyfikacja ISO ISO ePM1 60%	
	ePM ₁ 63,14%	ePM _{2,5} 70,18%	ePM ₁ 63,14%	
				<p>E_i – początkowa skuteczność frakcyjna (ISO 16890-2) E_{D,i} – skuteczność frakcyjna po kondycjonowaniu (ISO 16890-4) E_{A,i} – średnia skuteczność frakcyjna (ISO 16890-1)</p>

W badaniu jest wyznaczana skuteczność frakcyjna filtra powietrza w warunkach najmniej korzystnych (24-godzinne kondycjonowanie izopropanolem) i najbardziej korzystnych (stan początkowy filtracji), a następnie jest określana średnia wartość skuteczności frakcyjnej, stanowiąca wskaźnik klasyfikujący filtr powietrza. Taka procedura badania umożliwia przetestowanie filtra powietrza w zmiennych warunkach użytkowania.

Do badania parametrów użytkowych wysokoskutecznych filtrów powietrza jest stosowane stanowisko badawcze zgodne z PN-EN 1822-1, PN-EN ISO 29463-2 , PN-EN ISO 29463-3, PN-EN ISO 29463-4 i PN-EN ISO 29463-5 (rys. 2).



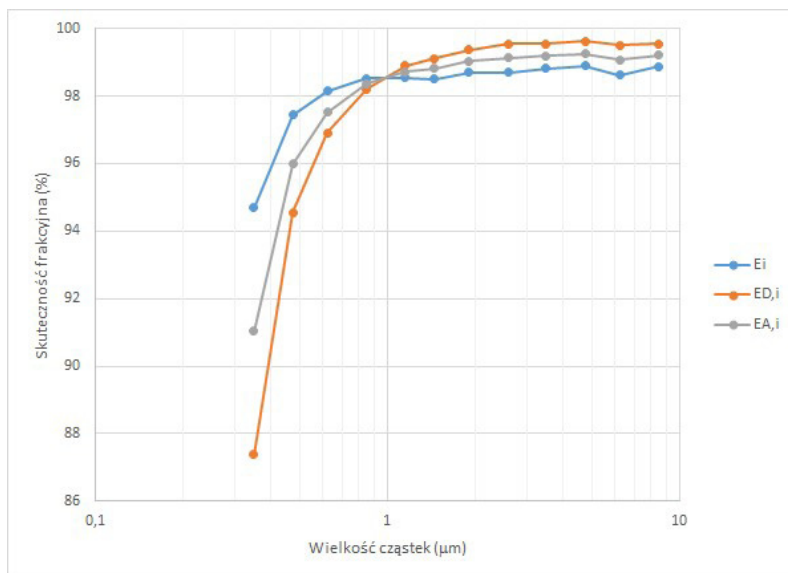
Rys. 2. Stanowisko do badania filtrów powietrza zgodnie z PN-EN 1822 i PN-EN ISO 29643

W tabeli 8 i na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań zgodne z metodą określania oporu przepływu i skuteczności filtracji cząstek MPPS oraz metodą oznaczania miejscowych nieszczelności elementów filtrujących (metoda skanowania).

Tabela 8. Parametry użytkowe wysokoskutecznego filtra powietrza zgodnie z PN-EN 1822-1

Początkowy opór przepływu	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	Klasyfikacja ISO Klasyfikacja EN
897 Pa	95,18%	96,36%	98,35%	ISO 15E E11 > 95%

ePM_x – skuteczność urządzenia oczyszczającego powietrze dla cząstek o średnicy między 0,3 μm a x μm [%]



Rys. 3. Zmiany skuteczności frakcyjnej określonej zgodnie z serią PN-EN ISO 29463

E_i – początkowa skuteczność frakcyjna (PN-EN ISO 29463-5)

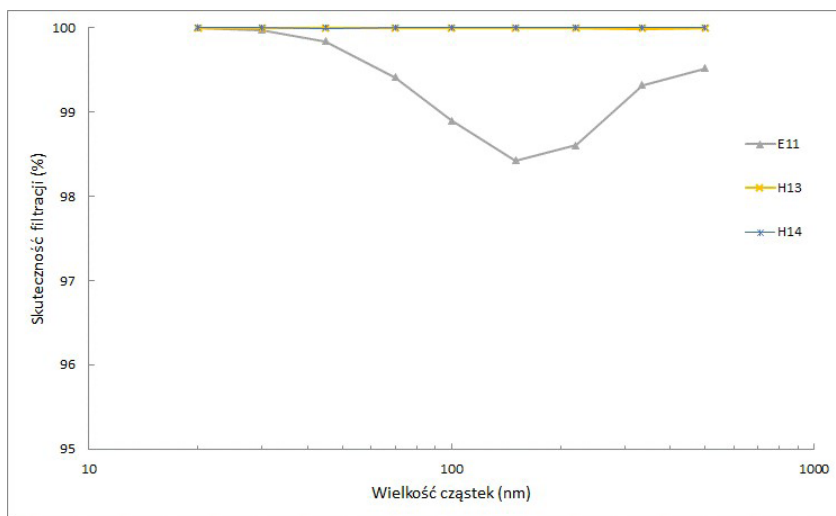
E_{D,i} – skuteczność frakcyjna po kondycjonowaniu (PN-EN ISO 29463-5)

E_{A,i} – średnia skuteczność frakcyjna (PN-EN ISO 29463-2)

W CIOP-PIB są prowadzone również badania zatrzymywania nanoaerozoli na materiałach stosowanych w filtrach wysokoskutecznych (rys. 4) [33]. Podczas projektowania i budowy stanowiska kierowano się wytycznymi normy PN-EN ISO 21083-1. W przypadku filtra klasy E11 krzywa skuteczności filtracji posiada charakterystyczne minimum związane z różnymi mechanizmami zatrzymywania dla cząstek ultradrobnych i submikrometrycznych (rys. 5). W przypadku filtrów wysokoskutecznych H13 i H14 otrzymano średnią wartość skuteczności na poziomie odpowiednio powyżej 99,99% oraz powyżej 99,999%.



Rys. 4. Stanowisko do badania parametrów filtrów powietrza zgodnie z PN-EN ISO 21083-1



Rys. 5. Wyniki badania skuteczności filtracji nanocząstek na filtrach wysokoskutecznych

5. MODEL WSKAŹNIKA JAKOŚCI FILTRA POWIETRZA

Głównym problemem przy projektowaniu kompozytów włóknin stosowanych do filtracji aerozoli jest poznanie zachowania się filtrów powietrza w czasie ich eksploatacji. Istnieje potrzeba poznania tzw. długości życia kompozytu włóknin w określonych warunkach pracy. Badania nad filtracją aerozoli generalnie sprowadzają się do określenia minimalnej skuteczności filtracji dla cząstek w określonym zakresie średnic (MPPS – rozmiar cząstek najbardziej penetrujących przez filtr powietrza).

Podstawowymi wskaźnikami użytkowymi filtrów powietrza są – skuteczność filtracji i opór przepływu. Parametry te zależą od:

- ➔ właściwości aerozoli (rozkładu wymiarowego cząstek, stężenia aerozolu, kształtu cząstek, właściwości elektrostatycznych, właściwości chemicznych, zwilżalności),
- ➔ właściwości przepływającego powietrza (temperatury, wilgotności, prędkości),
- ➔ parametrów strukturalnych filtru (konstrukcji filtru, właściwości zastosowanego materiału filtracyjnego).

SKUTECZNOŚĆ FILTRU JEST PARAMETREM OKREŚLAJĄCYM JEGO ZDOLNOŚĆ DO OCZYSZCZANIA POWIETRZA Z CZĄSTEK ZANIECZYSZCZEŃ O DANYM ROZKŁADZIE WYMIAROWYM.

OPÓR PRZEPIYU POWIETRZA PRZEZ FILTR MA NATOMIAST ISTOTNY WPŁYW NA DOBÓR URZĄDZEŃ WPROWADZAJĄCYCH POWIETRZE W RUCH PRZY PRZEPIYWIE PRZEZ PRZEGRODĘ FILTRUJĄCĄ.

W doborze filtrów powietrza w układach włókninowych oprócz podstawowych wskaźników użytkowych, czyli skuteczności filtracji i oporu przepływu aerozolu uwzględnia się wskaźniki do oceny ich jakości. Model wskaźnika jakości wysokoskutecznych filtrów powietrza składa się z niskokosztowych liczników cząstek aerozoli oraz dodatkowych układów peryferyjnych zapewniających zbieranie i przesyłanie danych pomiarowych. Model umieszcza się przed filtrem i za filtrem powietrza w centrali wentylacyjno-klimatyzacyjnej budynku.

Poprawność działania modelu wskaźnika jakości wysokoskutecznego filtra powietrza została przetestowana w warunkach laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistych prowadzenia oczyszczania powietrza w instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnej pomieszczenia pracy. W warunkach laboratoryjnych porównano wartości średnich skuteczności filtracji badanego filtra powietrza określone metodą zgodną z PN-EN ISO 29463 i modelem wskaźnika jakości filtra (rys. 6).



Rys. 6. Zmiany stężenia masowego frakcji PM_{2.5} w czasie określonej modelem wskaźnika jakości filtra powietrza

W wyniku porównania wartości skuteczności frakcyjnych PM2.5 określone zgodnie z PN-EN ISO 29463 oraz określone modelem wskaźnika jakości filtra stwierdzono dobrą zgodność uzyskanych wyników. Różnice w wartościach skuteczności filtracji dla frakcji aerozolu PM2.5 były bliskie 1% (tabela 9).

Tabela 9. Porównanie wartości skuteczności frakcyjnych PM2.5 określone zgodnie z PN-EN ISO 29463 oraz określone modelem wskaźnika jakości filtra

Tryb badania	Skuteczność filtracji frakcji PM2.5, %
Model wskaźnika jakości filtra	95,33
PN-EN ISO 29463	96,36
Różnica	1,03

Na podstawie wskazań modelu wskaźnika jakości zaobserwowano spadek skuteczności oczyszczania przez filtr wraz z czasem jego użytkowania do przedziału wartości od 57,5 do 67%.

Opracowany model wskaźnika jakości filtra powietrza wspomaga pracę central wentylacyjno-klimatyzacyjnych pomieszczeń oraz umożliwia poznanie zachowania się filtrów powietrza w czasie ich eksploatacji, czyli tzw. długości życia medium filtracyjnego w określonych warunkach pracy.

BIBLIOGRAFIA

1. Baron PA, Willeke K. Aerosol measurement. Principles, Techniques, and Applications [Pomiary aerozoli. Zasady, Metody i Zastosowania]. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001.
2. Spurny KR, ed. Advances in aerosol filtration [Postępy w filtracji aerozoli]. Taylor& Francis; 1998.
3. Podgórski A, Jackiewicz A. Filtration of aerosol particles in poly-disperse fibrous filters. I – Models formulation. Proceedings book of abstracts of EAC 2008 [Filtracja cząstek aerozoli w polidispersyjnych filtrach włókninowych. Modelowanie. Materiały konferencyjne EAC 2008], 24-29.09.2008, Saloniki, Grecja; 2008.
4. Mullins B, Mead-Hunter R, King A. Development of an open source computational fluid dynamic solver for discrete particle tracking – application to liquid aerosol filtration. Proceedings book of the International Aerosol Conference 2010 [Opracowanie otwartoźródłowej analizy obliczeniowej mechaniki płynów do śledzenia cząstek dyskretnych – zastosowanie do filtracji ciekłych aerozoli. Materiały konferencyjne IAC 2010], 29.09 – 3.10.2010, Helsinki, Finlandia; 2010.
5. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
6. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG.
7. Dyrektywa 89/391/EWG z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu zwiększania bezpieczeństwa i poprawy zdrowia pracowników podczas pracy.
8. Dyrektywa Rady 98/24/WE z dnia 7 kwietnia 1998 r. w sprawie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników przed ryzykiem związanym ze środkami chemicznymi w miejscu pracy (czternaście dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG).
9. Konwencja Nr 148 Międzynarodowej Organizacji Pracy dotycząca ochrony pracowników przed zagrożeniami zawodowymi w miej-

- scu pracy spowodowanymi zanieczyszczeniami powietrza, hałasem i wibracjami, przyjęta w Genewie dnia 20 czerwca 1977 r. (Dz. U. z 2005 r. Nr 66, poz. 574).
10. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie użytkowania maszyn przez pracowników podczas pracy (Dz. U. z 2002 r. Nr 191, poz. 1596 z późn. zm.).
 11. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz. U. z 1997 r. Nr 129, poz. 844 z późn. zm.).
 12. Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2022 poz. 1225).
 13. Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 17 stycznia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą (Dz.U. 2022 poz. 402).
 14. PN-EN 1822-1:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA, ULPA). Część 1: Klasyfikacja, badanie parametrów *użytkowych*, znakowanie.
 15. PN-EN 1822-2:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 2: Wytwarzanie aerozolu, przyrządy pomiarowe, statystyka zliczania cząstek.
 16. PN-EN 1822-3:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 3: Badanie płaskiego materiału filtracyjnego.
 17. PN-EN 1822-4:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 4: Określanie przecieku filtru (metoda przeszukiwania).
 18. PN-EN 1822-5:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 5: Określanie skuteczności filtru.
 19. PN-EN 779:2012. Przeciwpylowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Określanie parametrów filtracyjnych.

20. PN-EN ISO 16890-1:2017. Przeciwpółowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji skuteczności określony na podstawie wielkości cząstek pyłu (ePM).
21. PN-EN ISO 16890-2:2017. Przeciwpółowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Część 2: Pomiar skuteczności filtracji w funkcji wymiaru cząstek oraz oporu przepływu powietrza.
22. PN-EN ISO 16890-3:2017. Przeciwpółowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Część 3: Określanie skuteczności filtracji metodą gravimetryczną i oporu przepływu powietrza w zależności od masy zatrzymywanego pyłu.
23. PN-EN ISO 16890-4:2017. Przeciwpółowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Część 4: Metoda kondycjonowania mająca na celu wyznaczenie minimalnej badawczej skuteczności filtracji w funkcji wymiaru cząstek.
24. PN-EN ISO 15957:2015. Pyły testowe do oceny urządzeń oczyszczających powietrze.
25. EN 29463-1:2017. High efficiency filters and filter media for removing particles from air. Part 1: Classification, performance, testing and marking. [Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza. Część 1: Klasyfikacja, badanie właściwości użytkowych i znakowanie].
26. PN-EN ISO 29463-2:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza. Część 2: Wytwarzanie aerozolu, urządzenia pomiarowe i statystyka dotycząca zliczania cząstek.
27. PN-EN ISO 29463-3:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza. Część 3: Badania materiałów filtracyjnych z płaskich arkuszy.
28. PN-EN ISO 29463-4:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza. Część 4: Metoda badania szczelności elementów filtru – Metoda skanowania.
29. PN-EN ISO 29463-5:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza. Część 5: Metoda badania elementów filtru.

30. EN 1822-1:2019 – High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA). Part 1: Classification, performance testing, marking [Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA, ULPA). Część 1: Klasyfikacja, badanie parametrów, znakowanie].
31. EN 1822-1:2009. High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA). Part 1: Classification, performance testing, marking [Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA, ULPA). Część 1: Klasyfikacja, badanie właściwości użytkowych, znakowanie].
32. PN-EN 1822-1:2019. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Część 1: Klasyfikacja, badania właściwości użytkowych, znakowanie.
33. PN-EN ISO 14644-1:2016. Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane. Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek.
34. PN-EN ISO 14644-4:2006. Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane. Część 4: Projekt, konstrukcja i uruchomienie.
35. PN-EN ISO 21083-1:2019. Metoda badania skuteczności materiałów filtrujących powietrze ze sferycznych nanomateriałów. Część 1: Zakres wielkości od 20 nm do 500 nm.
36. ISO 12103-1:2016. Road vehicles – Test contaminants for filter evaluation. Part 1: Arizona test dust [Pojazdy drogowe – Badanie zanieczyszczeń do oceny filtra. Część 1: Pył testowy Arizona].

