

Metody oceny jakości filtrów powietrza stosowanych w instalacjach wentylacyjnych budynków

Methods of quality evaluation of air filters used in ventilation systems

TOMASZ JANKOWSKI

DOI 10.36119/15.2023.2.4

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniach, w szczególności na terenach zurbanizowanych, wymagane jest prawidłowe oczyszczanie powietrza przez filtry w centralach wentylacyjnych budynków. 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, zdefiniowane wymaganiami higienicznymi lub technologicznymi. W artykule zaproponowano zastosowanie wskaźnika do oceny jakości filtrów powietrza podczas ich użytkowania w centralach wentylacyjnych budynków. *Słowa kluczowe: filtracja powietrza, wentylacja, jakość powietrza, wskaźniki jakości filtrów powietrza, centrale wentylacyjne*

In order to ensure adequate air quality in rooms, in particular in urbanized areas, proper air purification on air filters in ventilation units of buildings is required. In general, both ventilation systems and in filtration and ventilation devices, the elements determining the quality of air extracted from or supplied to rooms are single – or multi-stage filtration systems, determined by hygienic or technological requirements. It was proposed to use the index to assess the quality of air filters during use in ventilation units of buildings.

Keywords: air filtration, ventilation, air quality, quality factors of air filters, air handling units

Wprowadzenie

Aerozole, w tym pyły są jednym 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 użytkownikom pomieszczeń pracy ochrony 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 ustanawia hierarchię działań, które pracodawcy powinni

realizować w celu profilaktyki zagrożeń wynikających ze stosowania substancji/mieszanin chemicznych.

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 pol-

skim jest priorytetowe 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 się odbywać przede wszystkim z wykorzystaniem różnych typów środków ochrony zbiorowej [1-4]:

- wentylacja,
- filtracja 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, zdefiniowane 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 nieustalanej filtracji wgłębnej, charakteryzowanej przez złożone mechanizmy transportu i zatrzymywania cząstek aerozoli [5-7].

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

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 [8].

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, PM_{2.5} i PM₁ w powietrzu atmosferycznym. Niekorzystne warunki wewnątrz budynków mogą skutkować poważnymi dolegliwościami zdrowotnymi u człowieka przejawiającymi się Syndromem Chorego Budynku (SBS – Sick Building Syndrome).

Podjęcie działań zmierzających do eliminowania zagrożenia zanieczyszczeniami powietrza w środowisku pracy człowieka jest zdeterminowane wymaganiami Dyrektyw Unii Europejskiej (89/391/EWG, 98/24/WE, 2016/425) [9-11], Konwencji Nr 148 Międzynarodowej Organizacji Pracy [12] oraz Rozporządzeniami (1997, 2002, 2022) [13-16].

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniach, w szczególności na terenach zurbanizowa-

nych, wymagane jest prawidłowe oczyszczanie powietrza na filtrach powietrza w centralach wentylacyjnych budynków.

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 są stosowane 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 wentylacyjnych są określone w normach krajowych. Zgodnie z normami serii PN-EN 1822:2009 [17-21] i PN-EN 779:2012 [22], przyjętymi w ramach prac Komitetu Technicznego nr 317 ds. Wentylacji i Klimatyzacji Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (PKN), ze względu na klasy, filtry powietrza dzieliło 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).

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 pomieszczeń o przeciętnych wymaganiach czystości powietrza oraz jako filtry wstępne przed filtrami o wyższej skuteczności w centralach wentylacyjnych pomieszczeń o wysokich wymaganiach czystości powietrza. Filtry

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

W 2017 roku PKN przyjął serię nowych norm: PN-EN ISO 16890-1:2017, PN-EN ISO 16890-2:2017, PN-EN ISO 16890-3:2017, PN-EN ISO 16890-4:2017 dotyczących badania i klasyfikowania filtrów powietrza stosowanych w wentylacji ogólnej [23-26]. Wdrożenie serii norm PN-EN ISO 16890:2017 [23-26] spowodowało wycofanie normy PN-EN 779:2012 [22]. 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 particulate matter (PM):

- PM₁₀ 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,
- PM₁ w przypadku cząstek o wymiarach od 0,3 do 1 µm.

Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z normą PN-EN ISO 16890-1:2017 [23] przedstawiona została w tabeli 1. Filtry powietrza są klasyfikowane na podstawie ich początkowego, grawimetrycznego zatrzymania, skuteczności filtracji ePM₁₀, ePM_{2,5}, ePM₁ 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 [27], nie nadano klasy ePM_x.

Dotychczas stosowana klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza dla wentylacji była przedstawiona w serii norm PN-EN 1822 [17-21]. Ostatnie wydanie serii ukazało się w roku 2009. Pod koniec 2019 roku, zaczęły obowiązywać w Polsce (Komitet Techniczny nr 317 PKN ds. Wentylacji i Klimatyzacji) nowe normy z grupy PN-EN ISO 29463 [29-32]. PN-EN ISO 29463-2:2018 [29] charakteryzuje metody wytwarzania aerozolu testowego, urządzenia pomiarowe i metody

Tabela 1. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z PN-EN ISO 16890-1:2017 [23]
Table 1. Classification of air filters according to PN-EN ISO 16890-1:2017 [23]

Oznaczenie grupy filtrów	Wymagania			Wartość odniesienia do klasy filtra
	ePM _{1,min}	ePM _{2,5,min}	ePM ₁₀	
ISO wstępne	-	-	< 50%	Początkowe, grawimetryczne zatrzymanie
ISO ePM ₁₀	-	-	≥ 50%	ePM ₁₀
ISO ePM _{2,5}	-	≥ 50%	-	ePM _{2,5}
ISO ePM ₁	≥ 50%	-	-	ePM ₁

statystyczne stosowane do badania filtrów i materiałów filtracyjnych zgodnie z PN-EN ISO 29463-3:2018 [30], PN-EN ISO 29463-4:2018 [31] i PN-EN ISO 29463-5:2022 [32]. Norma PN-EN ISO 29463-3:2018 [30] określa metodę badania skuteczności materiałów filtracyjnych. Norma PN-EN ISO 29463-4:2018 [31] określa referencyjną procedurę badawczą określania szczelności elementów filtra z użyciem metody skanowania. Stosuje się ją do filtrów o klasach od ISO 35H do ISO 75U. W normie PN-EN ISO 29463-5:2022 [32] podano metody badań służące do określania skuteczności filtrów dla frakcji cząstek o najbardziej penetrującej wielkości (MPPS). W miejsce normy ISO 29463-1:2017 [28] przyjęto normę PN-EN 1822-1:2019 [33]. Norma PN-EN 1822-1:2019 [33] zastąpiła normę PN-EN 1822-1:2009 [17]. Część 1 normy ISO 29463-1:2017 podaje klasyfikację, własności użytkowe, znakowanie filtrów [28].

Aktualnie w Polsce obowiązują normy: PN-EN 1822-1:2019 [33] oraz PN-EN ISO 29463-2,3,4:2018 [29-31] oraz PN-EN ISO 29463-5:2022 [32]. Norma PN-EN 1822-1:2019 [33] wprowadza zmiany w stosunku do ISO 29463-1:2017 [28]. Różnice i podobieństwa w klasyfikacji filtrów, zakresie stosowania i metodyce badań szczegółowo opisano w [34].

Klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza typu EPA, HEPA i ULPA, zgodna z normą PN-EN 1822-1:2019 [33], przedstawiona została w tabeli 2. Klasa filtra jest określana na podstawie wartości całkowitych i miejscowych skuteczności i penetracji filtracji. Filtry wysokoskuteczne są stosowane jako ostatni stopień w wielostopniowych układach filtracyjnych instalacji wentylacyjnych w pomieszczeniach o bardzo wysokich wymaganiach czystości powietrza (np. w salach operacyjnych szpitali, pomieszczeniach z procesami produkcji leków i surowic, elektroniki oraz artykułów spożywczych). 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

Tabela 3. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z ISO 29463-1 [28]
Table 3. Classification of air filters according to ISO 29463-1 [28]

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

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).

Klasyfikację wysokoskutecznych filtrów powietrza zgodnie z ISO 29463-1:2017 [28] przedstawiono w tabeli 3.

Dodatkowym badaniem, któremu powinno się poddać materiały filtracyjne stosowane w instalacjach wentylacyjnych podczas obróbki nanomateriałów, są pomiary stężenia nanoaerozolu w zakresie wymiarów cząstek od 20 nm do 500 nm zgodnie z wytycznymi normy PN-EN ISO 21083-1:2019 [35].

Wskaźnik jakości filtra powietrza

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

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 filtra (konstrukcji filtra, właściwości zastosowanego materiału filtracyjnego).

Skuteczność filtra jest parametrem określającym jego zdolność do oczyszczania powietrza z cząstek zanieczyszczeń o danym rozkładzie wymiarowym.

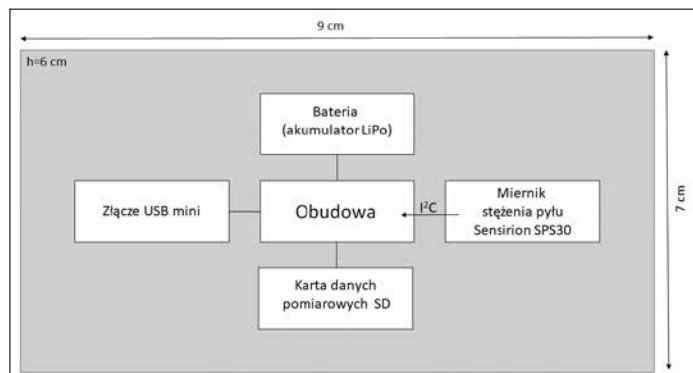
Opór przepływu powietrza przez filtr ma natomiast istotny wpływ na dobór urządzeń wprowadzających powietrze w ruch przy przepływie przez przegrodę filtrującą.

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 w czasie użytkowania. Proponowany wskaźnik jakości wysokoskutecznych filtrów powietrza składa się z dwóch niskokosztowych mierników masowego stężenia cząstek aerozoli oraz dodatkowych układów peryferyjnych zapewniających zbieranie i przesyłanie danych pomiarowych. Schemat wskaźnika jakości filtrów powietrza przedstawiono na rysunku 1.

Najważniejszymi kryteriami wyboru mierników stężenia cząstek jest ich niski koszt przy relatywnie wysokiej dokładności pomiarów i stabilności pracy w szerokim zakresie wilgotności względnej powietrza (od 20% do 80%) oraz temperatury powietrza (od 10°C do 40°C). Wybór miernika stężenia cząstek oparto na przeglądzie literatury [36-38]. Zastosowany miernik stężenia cząstek Sensirion SPS30 wykorzystuje zjawisko dyfrakcji światła na cząstkach aerozoli wprowadzanych do

Tabela 2. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z PN-EN 1822-1 [33]
Table 2. Classification of air filters according to PN-EN 1822-1 [33]

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

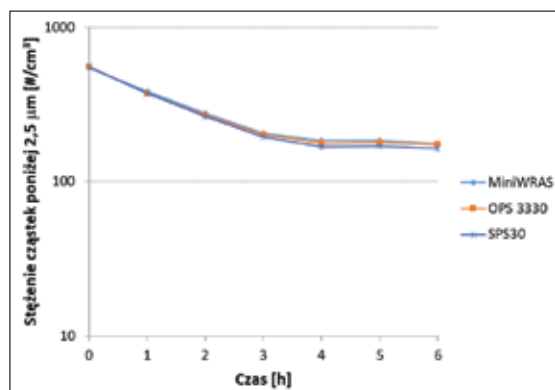


Rys. 1. Schemat blokowy wskaźnika jakości filtrów powietrza
Fig. 1. Block diagram of the air filter quality index

układu za pomocą wentylatora. Obraz dyfrakcyjny jest rejestrowany przez detektor ustawiony prostopadle do źródła. Liczba cząstek w aerozolu określana jest na podstawie liczby zarejestrowanych przez detektor sygnałów (zliczeń), natomiast wielkość na podstawie ich intensywności (większa cząstka odbija więcej światła w kierunku detektora).

W CIOP-PIB prowadzone były badania, podczas których sprawdzana była zdolność pomiarowa różnych niskokosztowych mierników stężenia cząstek aerozoli, w tym Sensiriona SPS30. Badania wykazały m.in., że licznik SPS30 charakteryzuje się dobrą korelacją uzyskiwanych wyników pomiarów masowego stężenia frakcji PM_{2.5} pyłu zawieszonego w stosunku do wybranych metod i urządzeń odniesienia. Jako urządzenia referencyjne podczas badań tanich mierników stężenia cząstek wykorzystano dwa wzorcowe mierniki: TSI OPS 3330 oraz Grimm MiniWRAS 1371.

Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono, że w przypadku przedziału wielkości cząstek od 0,3 μm do 2,5 μm tylko mierniki SPS30 podają zbliżone wartości stężenia liczbowego w stosunku do urządzeń odniesienia. Pozostałe liczniki w istotny sposób zaniżają stężenie liczbowe w tym zakresie. Na rysunku 2 przedstawiono wartości średniego godzinowego stężenia liczbowego cząstek o wielkości poniżej 2,5 μm w trakcie badania.



Rys. 2. Zmiany wartości średniego godzinowego stężenia liczbowego cząstek pyłu o wielkości od 0,3 μm do 2,5 μm
Fig. 2. Changes in the value of the average hourly number concentration of dust particles of 0.3 μm to 2.5 μm

Wyniki stężenia liczbowego cząstek podawanego przez licznik SPS30 są zbliżone w tym zakresie z wynikami uzyskanymi za pomocą referencyjnych liczników laboratoryjnych.

Badania weryfikacyjne wskaźnika jakości filtra powietrza

Poprawność działania wskaźnika jakości filtra powietrza została przetestowana w warunkach laboratoryjnych. Badania były prowadzone dla czterech wysokoskutecznych filtrów powietrza, dla których początkowa sprawność określana testem aerozolu ciał stałych i cieczy jest większa od 95% w odniesieniu do zakresu cząstek od 0,3 μm do 10 μm. Badanie weryfikacyjne wskaźnika jakości filtrów powietrza przeprowadzono w odniesieniu do elektrycznie neutralizowanych stałych

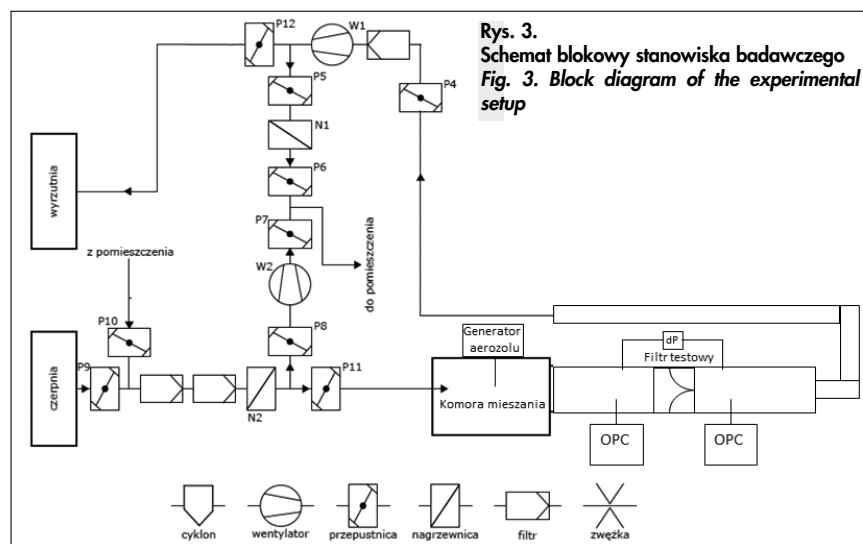
wysokoskutecznych filtrów powietrza stosowanych w instalacjach wentylacji mechanicznej była zgodna z normami PN-EN ISO 29463-2,3,4:2018 [29-31], PN-EN ISO 29463-5:2022 [32] oraz PN-EN 1822-1:2019 [33]. Podczas badań wykorzystywano następującą aparaturę pomiarową:

- Generator PALAS AGK 2000 – generator stałych cząstek KCl,
- Generator PALAS AGF 2.0 iP – generator ciekłych cząstek DEHS,
- Neutralizator TOPAS EAN 581 – neutralizator ładunków cząstek KCl,
- Ciśnieniomierze elektroniczne użytkowe wykonane przez Instytutu Mechaniki Górotworu PAN – pomiar spadku ciśnienia na filtrze oraz określenie strumienia objętości powietrza na dyszy pomiarowej w kanale.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3.

Wyniki badania przykładowego filtra powietrza wykonano zgodnie z PN-EN 1822-1 [33] oraz PN-EN ISO 29463 [29-32] przedstawiono w tabeli 4 i rysunkach 4 i 5.

Na podstawie powyższych wyników można zakwalifikować badany filtr do



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska badawczego
Fig. 3. Block diagram of the experimental setup

Tabela 4. Parametry użytkowe filtra powietrza zgodnie z PN-EN 1822-1 i ISO 29463-1
Table 4. Classification of air filters according to PN-EN 1822-1 and ISO 29463-1

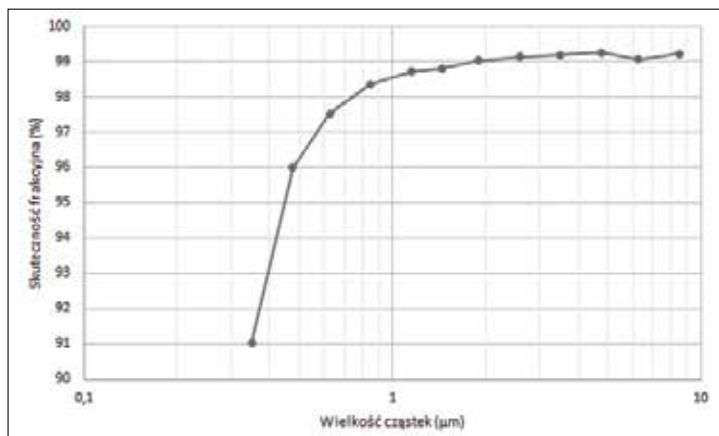
Początkowe opory przepływu	Skuteczność filtracji ePM _{2.5}	Klasyfikacja EN Klasyfikacja ISO
897 Pa	96,36%	E11 >95% ISO 15E

klasy E11 (zgodnie z klasyfikacją PN-EN 1822-1 [33]) oraz ISO15E (zgodnie z klasyfikacją ISO 29463-1 [28]). Dla nominalnego strumienia objętości powietrza w kanale pomiarowym wynoszącego 0,944 m³/s określono średnią skuteczność filtracji cząstek aerozolu testowego na poziomie większym od 95%.

W układzie pomiarowym badania z użyciem metody wskaźnika jakości filtra

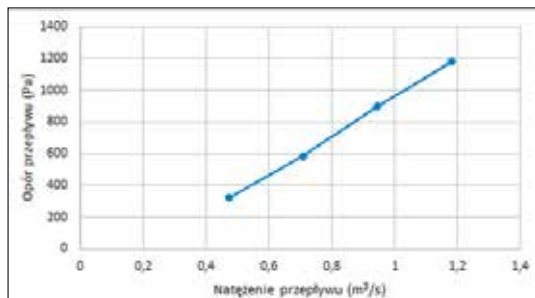
cząstek chlorku potasu (KCl) oraz ciekłych cząstek aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego (DEHS).

Referencyjna procedura postępowania przy wyznaczaniu parametrów użytkowych



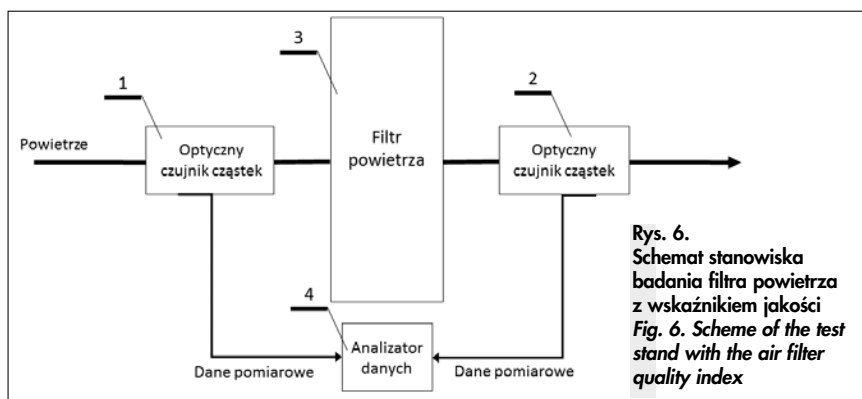
Rys. 4. Zmiany skuteczności frakcyjnej określonej zgodnie z PN-EN ISO 29463

Fig. 4. Changes in fractional efficiency determined according to PN-EN ISO 29463



Rys. 5. Zmiany oporu przepływu aerozolu w zależności od natężenia przepływu określone zgodnie z PN-EN ISO 29463

Fig. 5. Changes in the aerosol flow resistance depending on the flow rate determined according to PN-EN ISO 29463

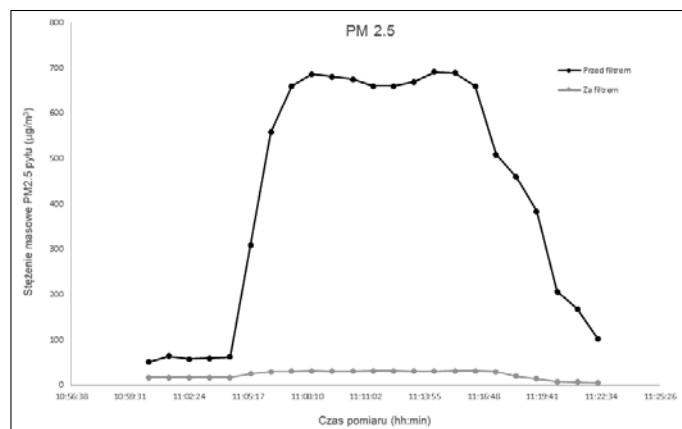


Rys. 6. Schemat stanowiska badania filtra powietrza z wskaźnikiem jakości
Fig. 6. Scheme of the test stand with the air filter quality index

powietrza, przedstawionym na rysunku 6, stosuje się dwa optyczne liczniki cząstek (1), (2), przy czym pierwszy optyczny licznik cząstek (1) zainstalowany jest przed badanym filtrem powietrza (3), a drugi optyczny licznik cząstek (2) zainstalowany jest za badanym filtrem powietrza. Optyczne liczniki cząstek (1), (2) są przyłączone do analizatora danych (4), czyli komputera z odpowiednim oprogramowaniem. W trakcie pracy filtra powietrza 3 optyczne liczniki cząstek (1), (2) dokonują cyklicznych (przykładowo, co 1 sekundę) pomiarów stężenia cząstek danego typu w powietrzu przed filtrem i za filtrem.

Optyczne liczniki cząstek 1, 2 wskazały wynik pomiaru jak na rysunku 7, na podstawie których określono skuteczność filtracji frakcji PM_{2,5} równą 95,33%. Skuteczność filtracji oceniono na podstawie średniej arytmetycznej z dziesięciu środkowych pomiarów z rysunku 7, przy pominięciu pomiarów skrajnych. Dla każdego z pomiarów obliczano skuteczność filtracji

Rys. 7. Zmiany stężenia masy frakcji PM_{2,5} w czasie określonym metodą wskaźnika jakości filtra powietrza
Fig. 7. Changes in the mass concentration of the PM_{2,5} fraction over time determined by the method of the air filter quality index



jako stosunek różnicy pomiarów przed i za filtrem oraz pomiaru przed filtrem $[100\% \cdot (C_{\text{przed}} - C_{\text{za}}) / C_{\text{przed}}]$.

Zatem wynik ten różnił się jedynie o 1,03% od wyniku uzyskanego zgodnie z normą PN-EN ISO 29463 (96,36%), co dowodzi dobrej dokładności sposobu oceny jakości filtra według wynalazku z zastosowaniem optycznych liczników

cząstek, wystarczającej do określenia aktualnej jakości filtra celem stwierdzenia czy należy dokonać wymiany filtra. W ten sposób możemy poznać zachowanie się filtrów powietrza w czasie ich eksploatacji w określonych warunkach pracy.

W warunkach laboratoryjnych porównano wartości średnich skuteczności filtracji badanego filtra powietrza (tabela 5) określone metodą zgodną z PN-EN 1822-1 i PN-EN ISO 29463 i metodą z użyciem wskaźnika jakości filtra.

Tabela 5. Porównanie wartości skuteczności filtracji aerozolu określone zgodnie z PN-EN ISO 29463 oraz określone z użyciem wskaźnika jakości filtra
Table 5. Comparison of aerosol filtration efficiency values determined according to PN-EN ISO 29463 and determined by the filter quality index

Tryb badania	Skuteczność filtracji powietrza
Metoda z użyciem wskaźnika jakości filtra	95,33%
Metoda zgodna z PN-EN 1822-1 oraz PN-EN ISO 29463	96,36%
Różnica	1,03%

W wyniku porównania wartości skuteczności filtracji aerozolu określonych metodą zgodną z PN-EN 1822-1 i PN-EN ISO 29463 oraz określonych metodą wskaźnika jakości filtra stwierdzono dobrą zgodność uzyskanych wyników. Różnice w wartościach skuteczności filtracji aerozolu testowego były bliskie 1%. Dowodzi to dobrej dokładności proponowanego sposobu oceny jakości filtra z zastosowaniem optycznych liczników cząstek, wystarczającej do określenia aktualnej jakości filtra celem stwierdzenia, czy nale-

ży dokonać wymiany filtra w instalacji wentylacyjnej.

Podsumowanie

Wdrożone normy PN-EN ISO 16890 [23-26], PN-EN ISO 29463 [29-32] i PN-EN 1822 [33] są dokumentami bazowymi do oceny zgodności filtrów powietrza

stosowanych w systemach wentylacji mechanicznej w budynkach użyteczności publicznej, przemysle, laboratoriach, obiektach mieszkalnych, handlowych itp. Zgodność z normami zapewnia prawidłową pracę filtrów, jakość wytwarzania i poprawną kontrolę ich parametrów. W efekcie normy są dokumentami niezbędnymi dla każdego polskiego producenta, projektanta oraz sprzedawcy materiałów filtracyjnych oraz filtrów powietrza w celu zapewnienia jakości i konkurencyjności oraz bezpieczeństwa użytkowników.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że w systemach wentylacji mechanicznej można stosować wskaźnik jakości filtrów powietrza jako metodę wspomagającą ocenę zmiany skuteczności filtracji aerozoli w czasie ich użytkowania w zmiennych warunkach środowiskowych.

Działanie wskaźnika polega na ciągłym pomiarze masowego stężenia aerozolu przed i za filtrem powietrza. Korzystanie z wskaźnika pomaga zmaksymalizować żywotność filtra, zapobiega nadmiernemu zużyciu urządzeń wymuszających przepływ powietrza, jak również pomaga zmniejszyć koszty eksploatacji całej instalacji wentylacyjnej budynku.

Metoda z wykorzystaniem wskaźnika jakości filtra powietrza wspomaga pracę central wentylacyjnych pomieszczeń oraz umożliwia poznanie zachowania się filtrów powietrza w czasie ich eksploatacji w określonych warunkach pracy.

Finansowanie

Publikacja opracowana w ramach V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej.

Zadanie nr 2.SP.14 pt. Opracowanie metodyki oceny jakości wysokoskutecznych filtrów powietrza z uwzględnieniem nowych wymagań norm międzynarodowych.

Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

BIBLIOGRAFIA

- [1] Szatański P., Capiński W., Misiński J., Przegląd zaleceń dla instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w związku z zagrożeniem koronawirusem SARS-CoV-2 i chorobą COVID-19. Instal, 5, 17-21, 2020. DOI: 10.36119/15.2020.5.3
- [2] Dąbrowski W., On computing of VDR rapid filters control system. Instal, 9, 48-51, 2020. DOI: 10.36119/15.2020.9.8
- [3] Szatański P., Capiński W., Prawdopodobieństwo przenoszenia wirusa SARS-CoV-2 drogą powietrzną w pomieszczeniach wentylowanych. Instal, 2, 23-29, 2022. DOI: 10.36119/15.2022.2.5
- [4] Serafin A., Charkowska A. Analiza wymagań prawnych oraz standardów wykonania central wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w wykonaniu higienicznym. Instal, 10, 34-41, 2022. DOI: 10.36119/15.2022.10.4
- [5] Willeke K., Baron P. A., Aerosol measurement. Principles, Techniques and Applications. John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [6] Podgórski, A., Jackiewicz, A., Filtration of aerosol particles in polydisperse fibrous filters. I – Models formulation. Proceedings book of abstracts of EAC 2008, Saloniki, Grecja, 2008.
- [7] 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, Helsinki, Finlandia, 2010.
- [8] 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.
- [9] 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 Dyrektywa 89/391/EWG z 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu zwiększania bezpieczeństwa i poprawy zdrowia pracowników podczas pracy.
- [10] 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 (czternasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust.1 dyrektywy 89/391/EWG).
- [11] Konwencja Nr 148 Międzynarodowej Organizacji Pracy dotycząca ochrony pracowników przed zagrożeniami zawodowymi w miejscu pracy spowodowanymi zanieczyszczeniami powietrza, hałasem i wibracjami, przyjęta w Genewie w 1977 r. (Dz. U. z 2005 r., Nr 66, poz. 574).
- [12] 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. 2002 nr 191 poz. 1596 z późniejszymi zmianami).
- [13] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 1997 nr 129 poz. 844 z późniejszymi zmianami).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] PN-EN 1822-1:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA, ULPA). Część 1: Klasyfikacja, badanie parametrów, znakowanie. Wycofana – zastąpiona przez: PN-EN 1822-1:2019.
- [17] PN-EN 1822-2:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA) – Część 2: Wytwarzanie aerozolu, przyrządy pomiarowe, statystyka zliczania cząstek. Wycofana bez zastąpienia.
- [18] PN-EN 1822-3:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA) – Część 3: Badanie płaskiego materiału filtracyjnego. Wycofana bez zastąpienia.
- [19] PN-EN 1822-4:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA) – Część 4: Określanie przecieku filtra (metoda przeszukiwania). Wycofana bez zastąpienia.
- [20] PN-EN 1822-5:2009. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA) – Część 5: Określanie skuteczności filtra. Wycofana bez zastąpienia.
- [21] PN-EN 779:2012. Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Określanie parametrów filtracyjnych. Wycofana bez zastąpienia.
- [22] PN-EN ISO 16890-1:2017. Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej – – Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji skuteczności określony na podstawie wielkości cząstek pyłu (ePM).
- [23] PN-EN ISO 16890-2:2017. Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej – – Część 2: Pomiar skuteczności filtracji w funkcji wymiaru cząstek oraz oporu przepływu powietrza.
- [24] PN-EN ISO 16890-3:2017. Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej – – Część 3: Określanie skuteczności filtracji metodą grawimetryczną i oporu przepływu powietrza w zależności od masy zatrzymanego pyłu.
- [25] PN-EN ISO 16890-4:2017. Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej – – Część 4: Metoda kondycjonowania mająca na celu wyznaczenie minimalnej badawczej skuteczności filtracji w funkcji wymiaru cząstek.
- [26] PN-EN ISO 15957:2015. Pyły testowe do oceny urządzeń oczyszczających powietrze.
- [27] ISO 29463-1:2017. High efficiency filters and filter media for removing particles from air – Part 1: Classification, performance, testing and marking
- [28] PN-EN ISO 29463-2:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza – Część 2: Wytwarzanie aerozolu, zliczenia pomiarowe i statystyka dotycząca zrzadzenia cząstek.
- [29] PN-EN ISO 29463-3:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza – Część 3: Badania materiałów filtracyjnych z płaskich arkuszy.
- [30] PN-EN ISO 29463-4:2018. Wysokoskuteczne filtry i materiały filtracyjne do usuwania cząstek z powietrza – – Część 4 : Metoda badania szczelności elementów filtra – – Metoda skanowania.
- [31] PN-EN ISO 29463-5:2022. Wysoko efektywne filtry i materiały filtrujące służące do usuwania cząstek stałych z powietrza – Część 5: Metoda badania elementów filtrujących.
- [32] PN-EN 1822-1:2019. Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA) – – Część 1: Klasyfikacja, badania właściwości użytkowych, znakowanie.
- [33] Eufilter s.c. <http://eufilter.com.pl/zdaniem-eksperta/> dostęp dnia 14.11.2022.
- [34] 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.
- [35] Jovašević-Stojanović M., Bartonova A., et al., On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter”, Environmental Pollution, 206, 696-704, 2015. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.08.035
- [36] Clements A.L., Griswold W.G., et al., Low-Cost Air Quality Monitoring Tools: From Research to Practice (A Workshop Summary), Sensors (Basel), 17(11), 2478, 2017. DOI: 10.3390/s17112478
- [37] McKercher G.R., Salmund J.A. et al., Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors, Environmental Pollution, 223, 102-110, 2017. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.12.045