

Tomasz Jankowski

Zasady oceny układów filtracji
cząstek aerozoli cieczy
emitowanych podczas
obróbki mechanicznej

ISBN 978-83-7373-122-6

CIOP  PIB





Tomasz Jankowski

Zasady oceny układów filtracji
cząstek aerozoli cieczy
emitowanych podczas
obróbki mechanicznej

Warszawa 2012

CIOP  **PIB**





Opracowano i wydano w ramach programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” (I, II etap) finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autor

mgr inż. Tomasz Jankowski – Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych
CIOP-PIB

Projekt okładki

Jolanta Maj

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2011

ISBN 978-83-7373-122-6

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

tel. (48-22) 623 36 98, fax (48-22) 623 36 93, www.ciop.pl





Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Parametry oceny układów filtracji w procesach obróbki mechanicznej	9
3. Konfiguracje parametrów oceny układów filtracji w procesach obróbki mechanicznej	10
3.1. Parametry strukturalne włóknin stosowanych w wielostopniowych układach filtracji	10
3.2. Parametry procesowe obróbki mechanicznej i fizykochemiczne aerozoli testowych	16
3.3. Parametry filtracyjne wielostopniowych układów filtracji	19
3.4. Metody badawcze	23
4. Przykładowe wyniki oceny wielostopniowego układu filtracji KA cząstek aerozoli cieczy	30
4.1. Ocena parametrów strukturalnych wielostopniowego układu filtracji	32
4.2. Ocena parametrów procesowych obróbki mechanicznej	33
4.3. Ocena parametrów fizykochemicznych aerozoli cieczy	36
4.4. Ocena parametrów użytkowych	39
5. Podsumowanie	42
6. Bibliografia	45







1. Wprowadzenie

W wielu procesach technologicznych, w szczególności z udziałem wysokich temperatur, stosuje się jako czynniki chłodzące różnego rodzaju oleje. Podczas procesów obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych są emitowane do środowiska pracy szkodliwe dla człowieka aerozole cieczy, które mogą być również czynnikiem niebezpiecznym jako przyczyna uszkodzenia sprzętu elektronicznego stosowanego do obsługi maszyn i urządzeń.

Zarówno w Polsce jak i w innych krajach podstawową przesłanką bezpieczeństwa pracy podczas procesów obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych jest zapewnienie użytkownikom pomieszczeń pracy ochrony przed ryzykiem związanym z narażeniem na cząstki aerozoli cieczy.

Podjęcie działań zmierzających do eliminowania zagrożenia zanieczyszczeniami powietrza w środowisku pracy człowieka jest zdeterminowane wymaganiami dyrektyw Unii Europejskiej [16 ÷ 18], konwencji nr 148 Międzynarodowej Organizacji Pracy [19] oraz prawem polskim [20, 21]. Dotychczasowe badania zagrożenia pracowników podczas procesów obróbki z użyciem olejów dotyczyły głównie oznaczania stężeń zawartych w nich substancji szkodliwych metodami spektrofotometrii absorpcyjnej w podczerwieni, bez uwzględniania wymiarów cząstek aerozoli cieczy [7]. Aktualnie wiele badań naukowych, prowadzonych zarówno w Polsce jak i na świecie, dotyczy przede wszystkim oceny i eliminowania zagrożenia cząstkami aerozoli w środowisku pracy człowieka z wykorzystaniem metod zliczania cząstek [1, 3, 9, 10, 11, 14].

Podstawą do opracowania zasad oceny układów filtracji cząstek aerozoli cieczy emitowanych w procesach obróbki mechanicznej były metody badań filtrów powietrza określone w normach serii PN-EN 1822 [23 ÷ 27] i PN-EN 779 [22], ustanowionych w ramach prac Komitetu Technicznego TC 195 Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego. W normach tych w zależności od celu badań, zaleca się stosowanie różnych metod badania, co w konsekwencji wymaga uwzględniania parametrów oceny, metod wytwarzania aerozoli, rodzaju aerozolu oraz parametrów technicznych przyrządów pomiarowych [22 ÷ 27].





Filtry powietrza są zasadniczymi elementami wielostopniowych układów filtracji (rys. 1.). Ze względu na klasy filtracyjne filtry powietrza dzieli się na:

- wstępne typu G
- filtry dokładne typu F
- wysokoskuteczne typu EPA (E), HEPA (H) i typu ULPA (U).



Rys. 1. Przykładowy schemat wielostopniowego układu filtracji

Klasyfikacja filtrów powietrza typu G i F, zgodna z normą PN-EN 779 [22], została przedstawiona w tabeli 1. Filtry wstępne typu G i F są klasyfikowane na podstawie ich średniej sprawności filtracji określonej testem pyłu syntetycznego i testem aerozolu o wymiarach cząstek 0,4 μm .

Tabela 1. Klasyfikacja wstępnych i dokładnych filtrów powietrza zgodnie z normą PN-EN 779 [22]

Klasa filtra	Końcowy opór przepływu Pa	Średnia sprawność określona testem pyłu syntetycznego %	Średnia sprawność dla cząstek o wymiarach 0,4 μm %
G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-
G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-
G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-
G4	250	$90 \leq A_m$	-
F5	450	-	$40 \leq E_m < 60$
F6	450	-	$60 \leq E_m < 80$
F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$
F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$
F9	450	-	$95 \leq E_m$

Filtry wstępne typu G są przede wszystkim stosowane w systemach wentylacji pomieszczeń o przeciętnych wymaganiach czystości powietrza oraz jako filtry wstępne przed filtrami o wyższej sprawności w systemach wentylacji pomieszczeń o wysokich wymaganiach czystości powietrza.





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

Klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza typu E, H i U zgodna z normami serii PN-EN 1822 została przedstawiona w tabeli 2. [23 ÷ 27].

Klasa filtra jest określana na podstawie wartości całkowitych i miejscowych sprawności i penetracji filtracji. Filtry wysokoskuteczne są stosowane jako ostatni stopień w wielostopniowych układach filtracji systemów wentylacji w pomieszczeniach o bardzo wysokich wymaganiach czystości powietrza. Sprawność całkowita określana dla filtrów typu E, H i U jest to sprawność uśredniona dla całej powierzchni czołowej filtra w danych warunkach eksploatacyjnych. Natomiast sprawność miejscowa jest sprawnością w określonym punkcie filtra w danych warunkach eksploatacyjnych. Badanie sprawności i penetracji filtracji przez filtry wysokoskuteczne wykonuje się dwoma testami aerozolu DEHS, DOP lub oleju parafinowego.

Tabela 2. Klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza zgodnie z normą PN-EN 1822 [23]

Klasa filtra	Wartość całkowita		Wartość miejscowa	
	sprawność %	penetracja %	sprawność %	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

W ramach prac prowadzonych w CIOP-PIB znormalizowane metody zostały rozszerzone o metody badawcze powstawania mgły olejowej w wyniku procesu dynamicznego i procesu termicznego oraz relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu, sprawności filtracji aerozoli cieczy i wskaźnika użyteczno-





ści wielostopniowych układów filtracji a parametrami strukturalnymi włók-
nin, procesowymi obróbki i fizykochemicznymi aerozoli.

Podstawą oceny układów filtracji w procesach obróbki mechanicznej, bę-
dących źródłem emisji cząstek aerozoli cieczy, są badania przeprowadzone
w warunkach doświadczalnych i rzeczywistych użytkowania wielostopnio-
wych układów filtracji, obejmujące:

- nowo projektowany układ filtracji
- aktualne rozwiązanie konstrukcyjnego układu filtracji.

Celem badań jest potwierdzenie doboru odpowiedniego układu filtracji
lub zwiększenie sprawności układu filtracji już zamontowanego przy obróbce
mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych pod kątem wyeliminowania lub
zmniejszenia zagrożenia emisją aerozoli cieczy.

Wiedzę zgromadzoną podczas badań mogą wykorzystać producenci ma-
teriałów filtracyjnych, pracodawcy, służby techniczne oraz pracownicy służby
bhp jako narzędzie do wspomagania prognozowania zastosowania omawia-
nych układów do zatrzymywania cząstek aerozoli cieczy, z zachowaniem naj-
korzystniejszych warunków filtracji, tzn. wysokiej sprawności filtracji, niskich
oporów przepływu i długiego czasu eksploatacji filtrów.

Badania obejmują określenie, na etapie początkowym i etapie dynamicz-
nych zmian, oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy przez wie-
lostopniowy układ filtracji w różnych warunkach procesowych oraz określenie
wskaźników jakości i użyteczności filtra w celu porównania i uszeregowania
układów filtracji stosowanych w danej aplikacji.





2. Parametry oceny układów filtracji w procesach obróbki mechanicznej

Ocenę układów filtracji podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych przeprowadza się w aspekcie powstawania mgły olejowej w wyniku procesu dynamicznego i procesu termicznego oraz relacji pomiędzy zmianami:

- ▶ parametrów filtracyjnych wielostopniowych układów filtracji:
 - ▶ początkowymi i końcowymi oporami przepływu
 - ▶ początkową sprawnością filtracji aerozoli cieczy
 - ▶ całkowitą i frakcyjną sprawnością filtracji
 - ▶ sprawnością filtracji cząstek najbardziej penetrujących (MPPS)
 - ▶ wskaźnikiem jakości i użyteczności filtra

a:

- ▶ parametrami strukturalnymi wielostopniowych układów filtracji, w szczególności:
 - ▶ grubością warstwy filtrującej w wielostopniowych układach filtracji
 - ▶ porowatością wielostopniowych układów filtracji
 - ▶ sposobem ułożenia warstw filtrujących w wielostopniowych układach filtracji
- ▶ parametrami procesowymi obróbki mechanicznej symulowanymi przez:
 - ▶ prędkość przepływu aerozolu cieczy przez wielostopniowy układ filtracji
 - ▶ wlotowe stężenie aerozolu cieczy w układzie pomiarowym
- ▶ parametrami fizykochemicznymi aerozoli cieczy reprezentowanymi przez:
 - ▶ rodzaj aerozolu testowego
 - ▶ temperaturę aerozolu cieczy.





3. Konfiguracje parametrów oceny układów filtracji w procesach obróbki mechanicznej

3.1. Parametry strukturalne włókien stosowanych w wielostopniowych układach filtracji

W systemach wentylacji i filtracji oczyszczających powietrze w procesach obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych stosuje się między innymi **włókny filtracyjne** wytwarzane przede wszystkim dwiema metodami:

- ▶ spun-lace
- ▶ melt-blown.

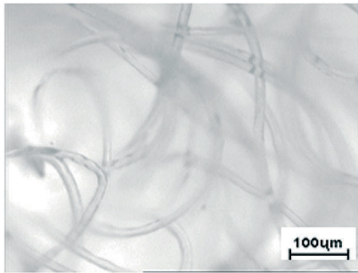
Metoda spun-lace to technika wytwarzania włókien metodą zawirowania włókien w runie za pomocą zdefiniowanych geometrycznie strumieni wodnych lub powietrznych. Technologia spun-lace należy do grupy zaawansowanych technik wytwarzania włókien. W sensie najbardziej ogólnym zasada produkcji włókien jest następująca: wytwarza się runo włókienne (podkład włókien o odpowiedniej strukturze) sposobem mokrym lub suchym. Runo to układa się na wspomagającym, metalowym sicie, o odpowiedniej perforacji. W celu wzajemnego powiązania włókien i uzyskania odpowiedniej struktury włókniny, determinującej jej cechy użytkowe, runo przechodzi następnie przez trzy strefy baterii dysz znajdujących się nad powierzchnią runa. W każdej strefie strumyki wody o zdefiniowanym kształcie geometrycznym są wytłaczane pod dużym ciśnieniem w kierunku powierzchni runa. Ciśnienie wody w strefie pierwszej wynosi około 30 kG/cm², a w trzeciej – od 55 do 90 kG/cm². W strefie środkowej jest to wartość pośrednia między ciśnieniami strefy pierwszej i trzeciej. Odległość górnej powierzchni runa od powierzchni dysz wynosi od 5 do 7,5 cm. Szybkość przesuwu runa – do 30 m/min. Po przejściu przez wszystkie pasażę natryskiwania runo jest odwracane i ta sama operacja odbywa się na odwróconej powierzchni runa. Przy tak wysokich ciśnieniach wytłaczane strumyki wody mogłyby powodować niekontrolowane przemieszczanie się włókien w runie





i w efekcie dawać przypadkową strukturę włókniny. Aby uniknąć tego niepożądanego zjawiska, górną powierzchnię runa przykrywa się siatką o odpowiedniej perforacji i geometrii rozmieszczenia oczek.

Na rysunku 2. przedstawiono przykładowy widok struktury włóknin spun-lace. Orientacja przestrzenna fragmentów włókien jako konsekwencja operacji ich płątania przez wodne strumyki, wzrost gęstości materiału i sił tarcia między włóknami, struktura włókniny i wynikające z tego właściwości fizyczne i mechaniczne wyrobu, zależą od rozwiązań aparaturowo-technologicznych ciągu produkcyjnego i zastosowanych parametrów technologicznych. Metoda spun-lace ma kilka wariantów aparaturowo-technologicznych, wykorzystywanych w zależności od tego, jaki zasadniczy typ wyrobu na danym parku maszynowym ma być wytwarzany w aspekcie jego zastosowania.



Rys. 2. Zdjęcie mikroskopowe włókniny spun-lace

Charakterystyczną cechą włóknin spun-lace jest to, że wytwarzane są z włókien odcinkowych, bez stosowania dodatkowo środków wiążących, takich jak polimery termoplastyczne, kauczuki syntetyczne, polimery akrylowe, poliuretany itd. Obecność fazy środka wiążącego zawsze komplikuje strukturę wyrobu, co jest szczególnie niepożądane w przypadku włóknin filtracyjnych. Kohezję włókniny spun-lace uzyskują w wyniku działania sił tarcia między włóknami w operacji płątania włókien przez wodne strumyki. Struktura włóknin i ich właściwości reologiczne zależą od rodzaju użytych włókien (właściwości fizykochemiczne i geometryczne) i parametrów technologicznych wytwarzania runa oraz włókniny.

Igłowane włókniny filtracyjne są wytwarzane m.in. z włókien poliestrowych (PES) o następujących parametrach strukturalnych [15]:

- grubość włókien w zakresie masy liniowej od 3,3 do 16,6 dtex
- masa powierzchniowa w zakresie od 150 do 500 g/m²
- grubość włóknin w zakresie od 5 do 15 mm
- masa właściwa około 0,003 g/cm³.

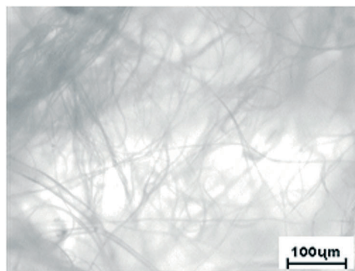
Stosowane w kraju i na świecie techniki spun-lace umożliwiają również wytwarzanie wielostopniowych włóknin filtracyjnych, w których poszczegól-





ne warstwy są wytwarzane z włókien o różnych grubościach, w wyniku stosowania różnej intensywności igłowania. Powyższe działania prowadzą do powstawania układów włókien o różnych strukturach i różnych wartościach porowatości.

Włókniny pneumatyczne otrzymywane **metodą melt-blown**, zwaną inaczej techniką rozdmuchu stopionego polimeru, umożliwiają produkcję materiałów filtracyjnych z włókien o grubościach submikronowych. Jeżeli przyjmiemy założenie, że mają one przekrój kołowy, to średnie średnice włókien, dla włókien o wysokiej skuteczności filtracji aerozoli, zawierają się w zakresie od 0,3 do 0,7 μm . Wytwarzane są też włókniny z włókien o rozrzucie średnic od 1 do kilkunastu mikrometrów. Im większe są różnice w rozmiarach włókien, tym mniej jednolita jest struktura tychże włókien. Techniki melt-blown pozwalają na wytwarzanie włókien o bardzo dobrych właściwościach filtracyjnych. Rysunek 3. przedstawia przykładowy widok włókniny melt-blown.



Rys. 3. Zdjęcie mikroskopowe włókniny melt-blown

W metodzie melt-blown polimer w postaci granulek jest przemieszczany z leja zasypowego do ogrzewanego cylindra wytłaczarki. Zostaje on doprowadzony do odpowiedniej lepkości przed wytłaczaniem z głowicy włóknotwórczej. Sprężone powietrze przechodzi z regulatora do nagrzewnicy, w której zostaje osuszone i podgrzane do właściwej temperatury. Następnie jest ono kierowane do głowicy włóknotwórczej, skąd wychodząc rozdmuchuje wytłaczane z dysz strumyki polimeru na elementarne włókna. Osiedlają one na urządzeniu odbiorczym, tworząc zwarte porowate runo.

Podstawowe parametry strukturalne wielostopniowych układów filtracji stosowane w ocenie układów filtracji podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych to:

- grubość włókien
- porowatość włókien
- sposób ułożenia warstw filtrujących.





Zgodnie z normą PN-EN ISO 9073-2 [28] metoda określania **grubości włókniny** polega na pomiarze odległości między płytką odniesienia, na której leży próbka włókniny, a równoległą do niej stopką dociskową wywierającą określone ciśnienie na powierzchnię materiału.

Dla każdej próbki włókniny należy wykonać sześć pomiarów grubości, a następnie obliczyć średnią arytmetyczną wartość grubości dla próbki włókniny, zgodnie ze wzorem:

$$G_{\text{próbka1}} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n G_{\text{próbka1},i}$$

gdzie:

n – liczba wykonanych pomiarów,

$G_{\text{próbka1},i}$ – jednostkowa wartość grubości próbki nr 1 dla danej włókniny, m.

Dla arytmetycznej średniej wartości grubości próbki włókniny oblicza się parametry statystyczne związane z niepewnością pomiaru, takie jak: odchylenie standardowe i współczynnik zmienności.

Analizę **porowatości włókniny**, wyrażonej jako stosunek wolnej przestrzeni wewnętrznej do jej całkowitej objętości, wykonuje się dwoma metodami: analityczną i doświadczalną.

Metoda analityczna wyznaczania porowatości włókniny bazuje na pomiarze wymiarów próbki (długości, szerokości i grubości), masy próbki oraz jej gęstości bezwzględnej. Z klasycznej definicji porowatości włókniny wynika, że:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_c} = \frac{V_c - V_w}{V_c} = 1 - \frac{V_w}{V_c}, \%$$

gdzie:

V_c – objętość całkowita próbki, m³,

V_p – objętość powietrza zawartego w próbce włókniny, m³,

V_w – objętość włókien, m³.

Objętość włókien wyraża się zależnością:

$$V_w = \frac{m}{\rho_w}, \text{ m}^3$$

gdzie:

m – masa próbki, g,

ρ_w – gęstość włókien, g/m³.





Zatem, uwzględniając gęstość gotowego materiału i gęstość surowców wchodzących w skład włókniny, porowatość danej włókniny oblicza się za pomocą wzoru:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{sr}}{\rho_w}, \%$$

gdzie:

ρ_{sr} – średnia gęstość włókniny, g/m^3 ,

ρ_w – gęstość włókien, g/m^3 .

Doświadczalną analizę porowatości włókniny można przeprowadzić z użyciem porometru kapilarnego model 4.900 (Porous Materials, Inc., USA). Przyrząd umożliwia scharakteryzowanie porowatości włókien w zakresie wielkości porów od 0,013 do 500 μm , z niepewnością odczytu 0,15%. Metoda doświadczalna pozwala na wyznaczenie:

- wymiarów największych porów
- przeciętnej wielkości porów
- krzywej charakteryzującej udziały frakcji porów o określonym zakresie wielkości
- wykresu stosunku zmian liczby porów do zmian odnoszących się do średniej wartości porów przez 1 m^2 próbki w funkcji średniej wartości wielkości porów
- krzywej stosunku zmian przekroju powierzchni pora o określonej średnicy do zmian odnoszących się do średniej wartości wielkości porów przez 1 m^2 próbki w funkcji średniej wartości wielkości porów.

Dla każdego typu włókniny należy pobrać 3 próbki w kształcie koła o średnicy równej 0,06 m, według zasad przygotowywania próbek do badań określonych w normie PN-EN ISO 9073-2 [28]. Na wstępie należy wprowadzić do programu komputerowego dane charakteryzujące badaną próbkę włókniny. Są to:

- skład surowcowy
- masa powierzchniowa włókniny
- grubość włókniny.

W celu wykonania pomiaru próbkę włókniny zanurza się w cieczy o małej wartości swobodnej energii powierzchni („Porewick”), w taki sposób, aby ciecz wyparła całe powietrze zawarte w porach materiału. Tak przygotowaną próbkę umieszcza się w głowicy pomiarowej porometru. Od dołu wtłacza się powietrze o stopniowo wzrastającym i ściśle kontrolowanym ciśnieniu. Gdy





ciśnienie powietrza przewyższa siły adhezji na granicy faz ciecz – włókno, z porów uwalnia się ciecz i zaczyna się swobodny przepływ powietrza przez włókninę. W miarę uwalniania cieczy z coraz to mniejszych i liczniejszych porów wzrasta strumień objętości powietrza przez włókninę, który jest podstawową wielkością charakteryzującą porowatość włókniny.

Udział porów o określonym zakresie wielkości (D) oblicza się z zależności:

$$D = \frac{Q}{d_w - d_n}$$

gdzie:

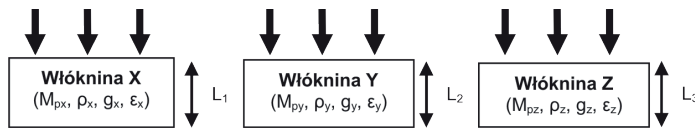
Q – udział strumienia objętości powietrza przez próbkę włókniny odpowiadający przyrostowi ciśnienia,

d_w – średnica porów o wyższych wymiarach,

d_n – średnica porów o niższych wymiarach.

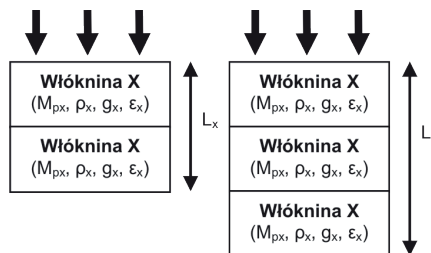
Wielostopniowe układy filtracji włókniny mogą tworzyć **kompozycje** o wybranym **sposobie ułożenia warstw filtrujących** o określonych parametrach strukturalnych.

Na rysunku 4. przedstawiono schematycznie pojedyncze włókniny filtracyjne. Z włókien tych formowano wielostopniowe układy filtracji, które poddaje się badaniom.



Rys. 4. Zestawienie włókien filtracyjnych

W wielostopniowych układach filtracji parametrem zmiennym jest grubość struktury, którą uzyskiwano przez nakładanie na siebie warstw pojedynczych włókien o stałych wartościach masy powierzchniowej, gęstości upakowania, ogólnej porowatości i grubości włókien (rys. 5.).

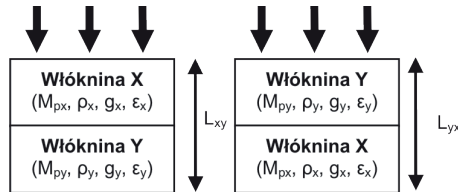


Rys. 5. Zestawienie wielostopniowych układów filtracji o stałych strukturach





Badaniom można poddawać także wielostopniowe układy filtracji, w których parametrem zmiennym zgodnie z kierunkiem przepływu aerozolu, oprócz grubości struktury, mogą być zmienne wartości masy powierzchniowej, gęstości upakowania, ogólnej porowatości i średnicy włókien (rys. 6.).



Rys. 6. Zestawienie wielostopniowych układów filtracji o zmiennych strukturach

3.2. Parametry procesowe obróbki mechanicznej i fizykochemiczne aerozoli testowych

Ocenę układów filtracji w procesach obróbki mechanicznej można przeprowadzić poprzez pomiar oporów przepływu aerozolu i stężenia cząstek aerozolu cieczy „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym dla zmiennych:

- ▶ wartości prędkości przepływu przez uchwyt pomiarowy, regulowanych z użyciem zaworów zintegrowanych z zestawem przepływomierzy i przepustnicy kanałowej wentylatora
- ▶ wartości liczbowego stężenia wlotowego aerozolu cieczy wytwarzanego z użyciem generatora atomizacyjnego i regulowanego systemem rozcieńczania
- ▶ typów aerozolu cieczy, określanych rodzajem testu zgodnie z normą PN-EN 1822-2:2009 [24]
- ▶ wartości temperatury powietrza przepływającego wraz z zawieszonymi w nim cząstkami aerozolu cieczy regulowanej z użyciem termostatu nagrzewnicy kanałowej.

Warunki procesowe powinny być reprezentatywne do badania aerozoli z ciekłą fazą rozproszoną, emitowanych podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych.

W tabeli 3. przedstawiono stosowane przykładowe konfiguracje zmiennych parametrów procesowych badań uzyskiwane w warunkach laboratoryjnych CIOP-PIB.





Tabela 3. Zestawienie przykładowych konfiguracji warunków procesowych badań

Prędkość przepływu aerozolu m/s	Liczbowe stężenie wlotowe aerozolu cząstek/cm ³		Temperatura powietrza przepływającego °C
	aerozol DEHS	aerozol DOP	
$U_1 = 0,05$	$C_1 = 3,24 \cdot 10^6$	$C_1 = 3,24 \cdot 10^5$	$T_1 = 20$ $T_2 = 25$ $T_3 = 30$ $T_4 = 35$
$U_2 = 0,10$	$C_2 = 2,95 \cdot 10^6$	$C_2 = 2,84 \cdot 10^5$	
$U_3 = 0,15$	$C_3 = 1,90 \cdot 10^6$	$C_3 = 2,14 \cdot 10^5$	
$U_4 = 0,20$	$C_4 = 9,80 \cdot 10^5$	$C_4 = 1,78 \cdot 10^5$	
$U_5 = 0,25$	$C_5 = 9,03 \cdot 10^5$	$C_5 = 9,11 \cdot 10^4$	
$U_6 = 0,50$	$C_6 = 8,78 \cdot 10^5$	$C_6 = 5,28 \cdot 10^4$	
$U_7 = 0,75$	$C_7 = 8,45 \cdot 10^5$	$C_7 = 4,40 \cdot 10^4$	
$U_8 = 1,00$	$C_8 = 7,96 \cdot 10^5$	$C_8 = 3,61 \cdot 10^4$	
$U_9 = 1,25$	$C_9 = 7,48 \cdot 10^5$	$C_9 = 3,09 \cdot 10^4$	
$U_{10} = 1,50$	$C_{10} = 5,97 \cdot 10^5$	$C_{10} = 2,75 \cdot 10^4$	
$U_{11} = 1,75$	$C_{11} = 3,98 \cdot 10^5$	$C_{11} = 2,35 \cdot 10^4$	
$U_{12} = 2,00$	$C_{12} = 3,19 \cdot 10^5$	$C_{12} = 2,12 \cdot 10^4$	

Badanie sprawności filtracji przez wybrane wielostopniowe układy filtracji można wykonać dwoma testami:

- ▶ testem aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego (DEHS)
- ▶ testem aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu ftalowego (DOP).

Wybór aerozoli testowych do symulowania emisji zanieczyszczeń podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych został dokonany zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1822-2:2009 [24]. Właściwości fizykochemiczne aerozoli cieczy DEHS i DOP podano w tabeli 4. [24].

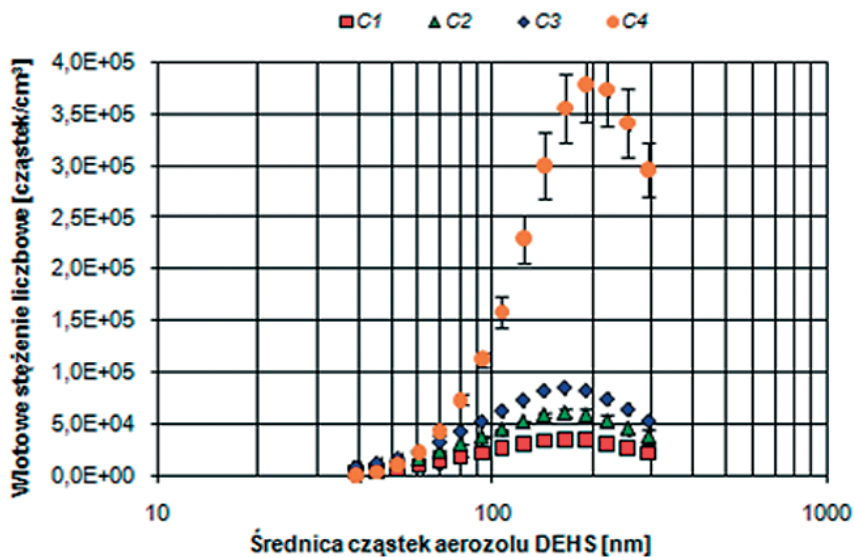
Przykładowe rozkłady wielkości cząstek aerozolu DEHS i DOP podawanych na badane wielostopniowe układy filtracji przedstawiono, odpowiednio, na rysunkach 7. i 8.





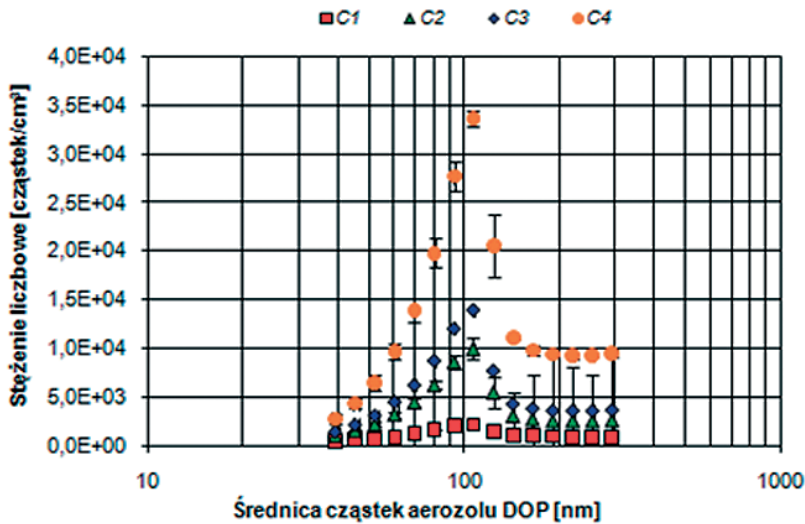
Tabela 4. Właściwości fizykochemiczne testowych aerozoli cieczi

Oznaczenie chemiczne	Ester bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego	Ester bis (2-etyloheksylu) kwasu ftalowego
Gęstość, kg/m ³	912	985
Temperatura topnienia, K	225	223
Temperatura wrzenia, K	529	557
Temperatura zapłonu, K	>473	473
Prężność pary przy 293 K, μ Pa	1,9	13
Lepkość dynamiczna, kg/m·s	0,022 ÷ 0,024	0,077 ÷ 0,082
Współczynnik załamania światła/długość fali, nm	1,450 /650	1,4836/589
	1,452 /600	
	1,4535/550	
	1,4545/500	
	1,4585/450	
	1,475 /400	



Rys. 7. Rozkłady wielkości cząstek aerozolu DEHS dla różnych stężeń aerozolu; prędkość przepływu aerozolu $U_1 = 0,05$ m/s





Rys. 8. Rozkłady wielkości cząstek aerozolu DOP dla różnych stężeń aerozolu; prędkość przepływu aerozolu $U_1 = 0,05$ m/s

3.3. Parametry filtracyjne wielostopniowych układów filtracji

Opory przepływu

Początkowe opory przepływu przez próbkę wielostopniowego układu filtracji o znanych parametrach strukturalnych powinny być mierzone przed podaniem aerozolu cieczy do układu pomiarowego. Przepływ powietrza jest wymuszany przez wentylator kanałowy umieszczony za uchwytem pomiarowym, a wartość prędkości jest regulowana z użyciem zaworów zintegrowanych z zestawem przepływomierzy i przepustnicą regulacyjną. Dla każdej próbki włókniny dokonuje się sześciu pomiarów różnicy ciśnień „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym, a następnie oblicza się średnią arytmetyczną wyników pomiarów jednostkowych, zgodnie ze wzorem:

$$\Delta p_{o, \text{sr}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{o, i}$$

gdzie:

n – liczba wykonanych pomiarów ($n = 6$),

$\Delta p_{o, i}$ – jednostkowa wartość oporu przepływu przez próbkę materiału filtracyjnego, Pa.





W czasie przepływu aerozolu cieczy są określane **zmiany oporów przepływu** na próbce wielostopniowego układu filtracji, przy czym czas uśredniania pomiaru oporów przepływu aerozolu cieczy przez wielostopniowy układ filtracji wynosi 5 minut:

$$\Delta p_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{p,i} (t_{\text{dosw}})$$

gdzie:

n – liczba wykonanych pomiarów ($n = 3$),

$f_{p,i}$ – jednostkowa wartość oporu przepływu przez próbkę materiału filtracyjnego, Pa,

t_{dosw} – czas pomiaru, s.

Sprawność filtracji

Sprawność filtracji w funkcji wymiarów cząstek dla danej próbki wielostopniowego układu filtracji określa się na podstawie pomiaru stężenia liczbowego cząstek aerozolu testowego „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym. Próbki aerozolu cieczy są pobierane „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym z wykorzystaniem zestawu sond do poboru w sposób izokinetyczny, a następnie cząstki są zliczane z użyciem kondensacyjnego licznika w przedziale średnic od 40 do 300 nm (analyzer ruchliwości elektrycznej cząstek LDMA, model 3080L).

Dla każdej próbki wielostopniowego układu filtracji wykonuje się trzy pomiary stężenia liczbowego cząstek aerozolu, zarówno „przed” jak i „za” badanym materiałem filtracyjnym. Następnie oblicza się średnie stężenie liczbowe dla danego zakresu wymiarowego cząstek z wyników pomiarów jednostkowych, zgodnie ze wzorami:

$$C_{\text{sr}}^{\text{przed}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i^{\text{przed}}$$

$$C_{\text{sr}}^{\text{za}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i^{\text{za}}$$

gdzie:

n – liczba wykonanych pomiarów ($n = 3$),

C_i^{przed} – jednostkowa wartość stężenia liczbowego aerozolu zmierzona „przed” próbką materiału filtracyjnego, cząstek/cm³,

C_i^{za} – jednostkowa wartość stężenia liczbowego aerozolu zmierzona „za” próbką materiału filtracyjnego, cząstek/cm³.





Średnią sprawność filtracji przez próbkę wielostopniowego układu filtracji dla danego zakresu wymiarowego cząstek określa się ze wzoru:

$$E_{\dot{s}r} = \left(\frac{C_{\dot{s}r}^{\text{przed}} - C_{\dot{s}r}^{\text{za}}}{C_{\dot{s}r}^{\text{przed}}} \right) \cdot 100$$

gdzie:

$C_{\dot{s}r}^{\text{przed}}$ – średnie stężenie liczbowe aerozolu „przed” próbką materiału filtracyjnego, cząstek/cm³,

$C_{\dot{s}r}^{\text{za}}$ – średnie stężenie liczbowe aerozolu „za” próbką materiału filtracyjnego, cząstek/cm³.

Dane obliczeniowe uśrednionych wartości sprawności filtracji w zależności od wymiarów cząstek aerozolu cieczy umożliwiają przedstawienie wyników zmian wartości **całkowitej sprawności filtracji** ($E_{\text{całk}}$) i wartości **sprawności cząstek najbardziej penetrujących przez wielostopniowy układ filtracji** (E_{MPPS}).

W czasie przepływu aerozolu cieczy są określane **zmiany sprawności filtracji** w próbce wielostopniowego układu filtracji, przy czym czas uśredniania pomiaru sprawności filtracji aerozolu cieczy przez wielostopniowy układ filtracji wynosi 5 minut:

$$E_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{E,i}(t_{\text{dosw}})$$

gdzie:

n – liczba wykonanych pomiarów ($n = 3$),

$f_{E,i}$ – jednostkowa wartość chwilowa sprawności filtracji w próbce materiału filtracyjnego, %,

t_{dosw} – czas pomiaru, s.

Wskaźniki do oceny jakości i użyteczności układów filtracji w stanie ustalonym i niestalonym procesu filtracji aerozoli cieczy

W klasycznej teorii filtracji wgłębnej aerozoli w materiałach filtracyjnych przyjmuje się, że opory przepływu aerozolu przez warstwę filtrującą są proporcjonalne do jej grubości. Jednocześnie sprawność filtracji cząstek aerozolu rośnie wykładniczo wraz z grubością układu filtracyjnego. Stąd do jednoczesnej oceny zmian właściwości filtracyjnych wielostopniowych układów filtracji wprowadzono **wskaźnik jakości filtra (QF)** opisany równaniem [2]:





$$QF = \frac{-\ln(1 - E_{\text{całk}})}{\Delta p}$$

gdzie:

$E_{\text{całk}}$ – całkowita sprawność filtracji wielostopniowego układu filtracji,

Δp – opory przepływu aerozolu przez wielostopniowy układ filtracji.

Tak określony wskaźnik QF jest powszechnie stosowany do porównywania jakości wielostopniowych układów filtracji o różnych grubościach w stanie ustalonym filtracji powietrza (etap początkowy procesu filtracji powietrza). Kompleksową analizę wskaźnika QF przeprowadza się dla filtracji cząstek aerozolu cieczy przy różnych wartościach prędkości przepływu i wlotowego stężenia aerozolu.

W stanie nieustalonym procesu filtracji aerozoli cieczy proponuje się wykorzystanie **wskaźnika użyteczności filtra (FUF)** uwzględniającego rzeczywiste koszty inwestycyjne i operacyjne ponoszone przez użytkownika układu filtracji. Do praktycznych zastosowań wskaźnik FUF można wyrazić następującym wzorem [12]:

$$FUF = \left(\frac{C_0 \cdot \eta_p}{\Delta p_0 \cdot u_{pe}} \right) \left[\frac{\int_0^{t_f} E_{\text{całk}}(t) dt}{t_c + \int_0^{t_f} \frac{\Delta p(t)}{\Delta p_0} dt} \right]$$

gdzie:

$E_{\text{całk}}(t)$ – chwilowa całkowita sprawność filtracji wielostopniowego układu filtracji,

$\Delta p(t)$ – chwilowe opory przepływu aerozolu przez układ filtracji,

Δp_0 – początkowe opory przepływu aerozolu przez układ filtracji,

η_p – sprawność mechaniczna wentylatora,

u_{pe} – jednostkowa cena energii elektrycznej,

C_0 – wlotowe stężenie aerozolu cieczy,

t_c – stała czasowa zależna od ceny jednostki masy układu filtracji, masy powierzchniowej, prędkości przepływu aerozolu, początkowych oporów przepływu, sprawności mechanicznej wentylatora i jednostkowej ceny energii,

t_f – czas trwania filtracji.

Wyznaczenie przebiegu wskaźnika FUF w warunkach rzeczywistych użytkownika układu filtracji wymaga znajomości danych doświadczalnych chwilowych wartości sprawności filtracji i oporów przepływu aerozolu cieczy.





3.4. Metody badawcze

Podstawowe zasady określające metody badania filtrów i kryteria ich oceny są zawarte w normach serii PN-EN 1822 [23 ÷ 27] i PN-EN 779 [22].

Norma **PN-EN 779:2005** opisuje metody określania sprawności filtrów wstępnych (klasy G1 ÷ G4) i filtrów dokładnych (klasy F5 ÷ F9). W normie tej przedstawiono metody badania filtrów powietrza, dla których strumień objętości powietrza mieści się w zakresie od 850 do 5400 m³/h, a początkowa sprawność określona testem pyłu atmosferycznego jest mniejsza od 98% w odniesieniu do cząstek 0,4 μm.

Filtry powietrza mogą być badane aerozolem testowym i syntetycznym pyłem obładowującym.

Zgodnie z normą sprawność filtrów wstępnych jest określana testem pyłu syntetycznego ASHRAE 52.1 o następującym składzie:

- 72% wagowo znormalizowany pył testowy urządzeń oczyszczających powietrze według ISO 12103-1
- 23% wagowo sadza czarna
- 5% wagowo lintery bawełniane.

Do badania sprawności filtrów dokładnych zalecanym aerozolem testowym jest DEHS, a sprawność tych materiałów należy wyznaczać metodą zliczania cząstek przed i za filtrem. Metoda oceny filtrów dokładnych polega na równomiernym rozpraszaniu olejowego aerozolu DEHS w kanale przed badanym filtrem, a następnie pobieraniu próbek aerozolu przed i za badanym filtrem i analizowaniu ich przez optyczny licznik w celu określenia sprawności zatrzymywania cząstek przez dany filtr.

Badania parametrów filtrów o wysokiej sprawności przeprowadza się zgodnie z normami serii **PN-EN 1822**. W normach przedstawiono wymagania dotyczące filtrów powietrza o wysokiej sprawności stosowanych w systemach wentylacji, a także określono sposoby wyznaczania sprawności filtrów w celu ujednoczenia ich klasyfikacji. Sprawność filtracji określana jest metodą zliczania cząstek przed i za filtrem. Metoda oceny filtrów o wysokiej sprawności składa się z trzech etapów, z których każdy może być wykonany niezależnie [5, 6, 8]:

- określenie sprawności frakcyjnej materiału filtracyjnego przy nominalnej prędkości przepływu powietrza, w tym określenie wymiaru najbardziej penetrujących cząstek MPPS, dla której sprawność filtracji materiału filtracyjnego osiąga minimum





- ▶ badanie przecieku filtra (metoda przeszukiwania) przy nominalnym strumieniu objętości powietrza z użyciem aerozolu testowego o średnim wymiarze cząstek odpowiadającym MPPS
- ▶ określenie całkowitej sprawności filtra przy użyciu aerozolu testowego i nominalnym strumieniu objętości powietrza.

Na potrzeby oceny ochrony pracowników podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych **metody znormalizowane zostały rozszerzone o metody badawcze** powstawania mgły olejowej w wyniku procesu dynamicznego i procesu termicznego oraz relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu, sprawności filtracji aerozoli cieczy i wskaźnika użyteczności wielostopniowych układów filtracji.

Metoda badania sprawności filtracji aerozoli cieczy emitowanych podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych polega na określeniu zmian właściwości filtracyjnych w stanie ustalonym i nieustalonym procesu filtracji przez wielostopniowe układy filtracji o znanych i ustalonych parametrach strukturalnych.

Próbki materiałów filtracyjnych do badań są przygotowywane z użyciem wykrojnika (np. wykrojnika kołowego typu M236, Thwing – Albert Europe, Belgia) zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 9073-2:2002 [28].

Wytypowane do badań wielostopniowe układy filtracji podlegają ocenie pod kątem określenia następujących parametrów strukturalnych włókien:

- ▶ grubości włókien – grubościomierz elektroniczny Tilmex-79 wykonany na Wydziale Inżynierii i Marketingu Tekstyliów Politechniki Łódzkiej
- ▶ masy powierzchniowej włókien – elektroniczna waga analityczna Sartorius typu R160P (Sartorius GmbH, Niemcy)
- ▶ gęstości upakowania włókien – metoda obliczeniowa
- ▶ średniej średnicy włókien – system przetwarzania i analizy obrazów mikroskopowych Multiscanbase (CSS II, Warszawa)
- ▶ porowatości włókien – porometr kapilarny model 4.900 (Porous Materials, Inc., USA).

Badania zmian oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy są przeprowadzane z wykorzystaniem modułu pomiarowego, na który składają się następujące elementy:

- ▶ system zespołów dozowania i poboru próbek aerozolu cieczy





- ▶ atomizacyjny generator aerozolu cieczy AGF 2.0 iP (Palas, Niemcy) w zakresie wymiarowym do 5 μm
- ▶ system analizy wymiarowej cząstek SMPS model 3936 (TSI, USA) składający się z analizatora ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA, model 3080L), kondensacyjnego licznika cząstek (CPC, model 3022A), umożliwiającego pomiar stężenia liczbowego cząstek aerozolu cieczy w zakresie wymiarowym do 0,8 μm
- ▶ cyfrowe mikromanometry różnicowe (Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie) do pomiaru oporów przepływu przez badany materiał filtracyjny i przepustnicę regulacyjną w zakresie do 5000 Pa
- ▶ zestaw przepływomierzy, umożliwiających pomiar strumienia objętości powietrza przepływającego przez badaną próbkę włókniny w zakresie od 1 ml/min do 500 l/min
- ▶ zespół do wymuszania przepływu powietrza przez próbkę włókniny – wentylator kanałowy VENT-100L, przepustnica regulacyjna, tłumik kanałowy (Venture Industries Sp. z o.o., Polska).

Schemat stanowiska do badania właściwości filtracyjnych wielostopniowych układów filtracji przedstawiono na rysunku 9.

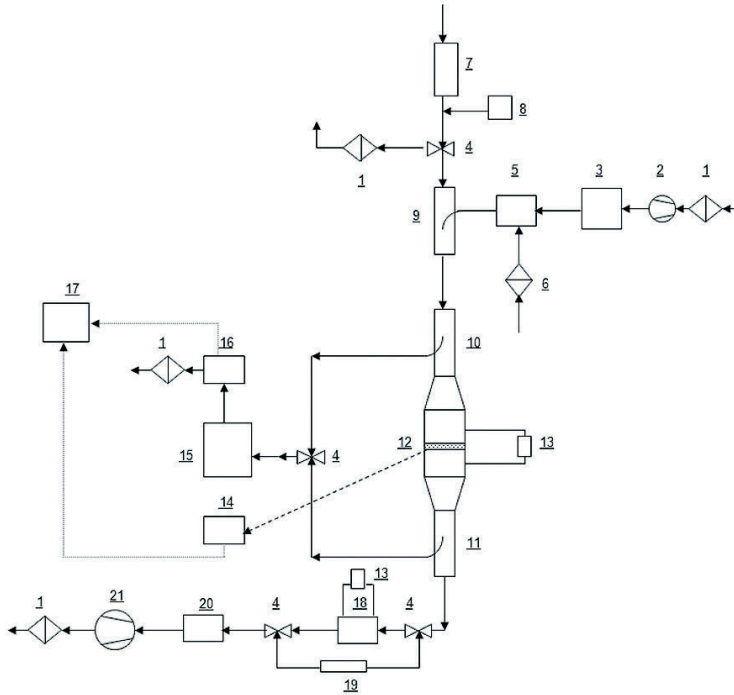
Powietrze jest zasysane z otoczenia i przepływa przez elektryczną nagrzewnicę kanałową (7) DH-100/03, gdzie następuje ogrzanie powietrza do wymaganej temperatury z użyciem termostatu TK-1 (8).

Aerozol cieczy o określonym stężeniu i rozkładzie wymiarowym jest wytwarzany w generatorze atomizacyjnym. Wbudowana pompa zasysa powietrze z otoczenia generatora pod ciśnieniem wynoszącym 0,6 bara. Strumień powietrza na wlocie do generatora jest oczyszczany w filtrze wstępnym, a następnie w filtrze wysoko skutecznym typu HEPA/ULPA. Zastosowanie na wlocie filtrów zapobiega uszkodzeniu pompy oraz zapewnia przepływ powietrza pozbawionego cząstek, które mogłyby znacząco wpłynąć na dokładność procesu generowania aerozolu. Czyste powietrze jest wprowadzane do oleju DEHS (DOP lub inny) zasysanego ze zbiornika cieczy do dyszy, a wytworzona mgła aerozolu jest transportowana stycznie do cyklonu. Cyklon pracuje na zasadzie wymuszenia ruchu powietrza wraz z zawieszonymi w nim cząstkami i zawirowania go w środku cyklonu. Frakcja dużych cząstek jest zatrzymywana w zbiorniku cieczy. Natomiast pozostałe cząstki przechodzą swobodnie dalej do układu pomiarowego. Rozkład wymiarowy wytworzonych cząstek zależy





głównie od charakterystyki separacyjnej zastosowanego cyklonu, a w mniejszym stopniu od początkowego rozkładu wymiarowego kropeł wytworzonych w dyszy wlotowej generatora.



Rys. 9. Schemat stanowiska badania wielostopniowych układów filtracji.

1 – filtr powietrza, 2 – wbudowana pompa powietrza, 3 – generator testowego aerozolu cieczy, 4 – zawór odcinający, 5 – system rozcieńczania stężenia aerozolu cieczy, 6 – układ oczyszczania sprężonego powietrza, 7 – nagrzewnica kanałowa, 8 – termostat, 9 – zespół dozowania testowego aerozolu cieczy, 10 – zespół poboru próbek aerozolu „przed” materiałem filtracyjnym, 11 – zespół poboru próbek aerozolu „za” materiałem filtracyjnym, 12 – uchwyt pomiarowy próbki włókniny, 13 – cyfrowy mikromanometr różnicowy, 14 – zestaw pomiarowy VIVO, 15 – analizator ruchliwości elektrycznej cząstek, 16 – kondensacyjny licznik cząstek (CPC), 17 – komputer, 18 – przepustnica regulacyjna, 19 – zestaw przepływomierzy, 20 – tłumik kanałowy elastyczny, 21 – wentylator kanałowy

Za pomocą wbudowanej pompy wygenerowane cząstki aerozolu cieczy są podawane ze stałą prędkością do systemu rozcieńczania VKL-10 (5), co zapewnia obniżenie stężenia aerozolu. System umożliwi dziesięciokrotne rozcieńczenie aerozolu, poprzez wymieszanie z oczyszczonym sprężonym powietrzem (6). Następnie mieszanina aerozolu testowego i powietrza jest podawana do stanowiska badawczego z użyciem zespołu dozowania (9). W zespole dozowania zastosowano sondę o wymiennych głowicach o wlotowych średnicach wewnętrznych w zakresie od 0,5 do 6,0 mm.

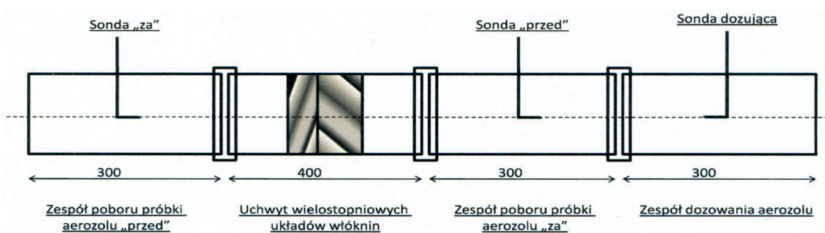




Przepływ aerozolu cieczy jest wymuszany przez wentylator kanałowy VENT-100L (21) wraz z tłumikiem (20), który ma ciągły regulator prędkości obrotowej, dzięki czemu możliwa jest płynna zmiana wartości strumienia objętości powietrza w układzie pomiarowym. Ponadto strumień objętości powietrza w układzie pomiarowym jest regulowany z użyciem zaworów (4) zintegrowanych z zestawem przepływomierzy (19) i przepustnicą (18).

Próbka wielostopniowego układu filtracji jest umieszczana w dolnej części uchwyty pomiarowego (12) stanowiącego centralną część zespołu poboru próbek aerozolu cieczy. Materiał filtracyjny zostaje dociśnięty, poprzez pierścienie dystansowe, górną ruchomą częścią uchwyty do jego dolnej części. W zespole poboru próbek aerozolu przed (10) i za (11) uchwytem pomiarowym (12) zastosowano sondy o wymiennych głowicach o wlotowych średnicach wewnętrznych w zakresie od 0,5 do 6,0 mm.

Schemat systemu zespołów dozowania i poboru próbek aerozolu cieczy „przed” i „za” uchwytem pomiarowym wielostopniowego układu filtracji przedstawiono na rysunku 10.

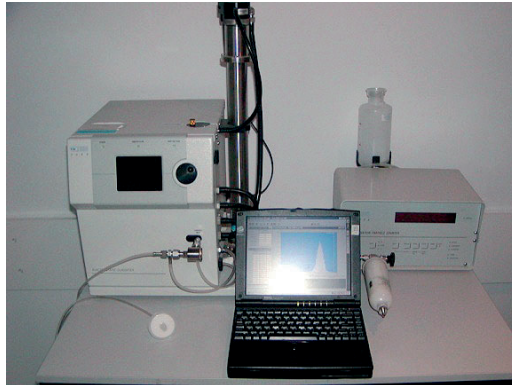


Rys. 10. Schemat systemu zespołów dozowania i poboru próbek aerozolu cieczy

Zestaw sond umożliwia pobór próbek powietrza „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym w sposób izokinetyczny. Dobór sond do pobierania próbek powietrza wynikał z zasady równości prędkości powietrza z aerozolem na wlocie do sondy oraz prędkości w przewodzie doprowadzającym powietrze do uchwyty pomiarowego. Zapewnia to niezmiennosc rozkładu wymiarowego cząstek przepływającego aerozolu.

Do poboru próbek aerozolu przed i za uchwytem pomiarowym stosuje się system analizy wymiarowej cząstek (SMPS, model 3936, TSI, USA). Widok ogólny systemu analizy wymiarowej cząstek (SMPS) przedstawiono na rysunku 11.





Rys. 11. Widok systemu analizy wymiarowej cząstek – SMPS (model 3936, TSI, USA)

System analizy wymiarowej cząstek SMPS umożliwia pomiar rozkładu wymiarowego cząstek „przed” i „za” wielostopniowym układem włókien z wykorzystaniem metody analizy ruchliwości elektrycznej.

W analizatorze ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA) cząstki są klasyfikowane według ich elektrycznej ruchliwości, która jest zależna od wymiarów cząstek i liczby ładunków elektrycznych zdeponowanych na danej cząstce.

Cząstki aerozolowe są zasysane przez wlot analizatora, którego konstrukcja zapewnia uzyskanie trzech wartości strumienia objętości aerozolu. Zdana wartość przepływu determinuje teoretyczny rozkład wymiarowy cząstek wchodzących do analizatora ruchliwości elektrycznej. Rzeczywisty zakres wymiarów cząstek dodatkowo zależy od rodzaju aerozolu, temperatury, ciśnienia i czasu procesu pomiarowego.

Analizator składa się z dwóch koncentrycznych elektrod. Cząstkom aerozolu zostają nadane ładunki elektryczne o znanej liczbie, po czym cząstki przepływają wzdłuż zewnętrznej elektrody do DMA. Jednocześnie czyste powietrze jest wprowadzane izokinetycznie wzdłuż elektrody wewnętrznej. Wytworzone pole elektryczne między elektrodami powoduje, że cząstki o jednakowej polaryzacji poruszają się prostopadle do kierunku przepływu strumienia w stronę wewnętrznej elektrody, a cząstki przeciwnie naładowane są przyciągane do elektrody zewnętrznej. Przez szczelinę w dolnej części DMA są odprowadzane cząstki o określonej ruchliwości elektrycznej. Aerozol jest zasysany do kondensacyjnego licznika cząstek (CPC) za pomocą wbudowanej pompy pracującej przy stałym strumieniu objętości powietrza wynoszącym 0,3 lub 1,5 l/min. Czas pobierania próbki aerozolu wynosi 135 s. Cząstki są powiększane przez kondensację pary, a następnie mierzone metodą rozpro-





szenia światła. W zależności od wymiarów cząstek stężenie jest określane poprzez zliczanie lub fotometrycznie.

Kondensacyjny licznik cząstek (CPC) umożliwia zliczanie cząstek w zakresie od 7 nm do 3 μm i pomiar stężenia liczbowego cząstek do 10^7 cząstek/ cm^3 przy niedokładności pomiaru zależnej od stężenia:

- ▶ $\pm 10\%$ dla stężeń do $5 \cdot 10^5$ cząstek/ cm^3
- ▶ $\pm 20\%$ dla stężeń z zakresu $5 \cdot 10^5$ cząstek/ $\text{cm}^3 \div 10^7$ cząstek/ cm^3 .

Prawidłowe zliczanie cząstek aerozolu przez system analizy wymiarowej SMPS wymaga utrzymania następujących warunków przepływowych przez przyrządy:

- ▶ nadanie takiej samej wartości dla strumienia objętości aerozolu w kondensacyjnym liczniku cząstek (CPC) oraz strumienia objętości aerozolu w analizatorze ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA)
- ▶ stabilizacja na poziomie 10:1 proporcji wartości strumieni objętości w analizatorze (LDMA) odpowiednio dla powietrza osłonowego i aerozolu cieczy.



4. Przykładowe wyniki oceny wielostopniowego układu filtracji KA cząstek aerozoli cieczy

Poniżej przedstawiono przykładową ocenę charakterystyczną dla zastosowania wielostopniowego układu do filtracji cząstek aerozoli cieczy na podstawie relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy a:

- ▶ parametrami strukturalnymi wielostopniowego układu filtracji
- ▶ parametrami procesowymi obróbki mechanicznej
- ▶ parametrami fizykochemicznymi aerozoli cieczy.

Wielostopniowy układ filtracji (KA) tworzył kompozycję złożoną z włóknin filtracyjnych wytworzonych z użyciem metody spun-lace (A) i melt-blown (K). Szczegółowy opis metod wytwarzania włóknin spun-lace i melt-blown przedstawiono w rozdziale 3.1. Wybrane włókniny miały różną strukturę i charakteryzowały się parametrami strukturalnymi przedstawionymi w tabeli 5.

Tabela 5. Charakterystyka strukturalna włóknin filtracyjnych spun-lace i melt-blown

Parametr strukturalny	Symbol	Jednostka miary	Włóknina A	Włóknina K
Metoda wytwarzania	–	–	spun-lace	melt- lown
Grubość materiału	L_{sr}	mm	$5,31 \pm 0,01$	$2,55 \pm 0,08$
Masa powierzchniowa materiału	M_p	g/m^2	$282,37 \pm 0,001$	$67,97 \pm 0,003$
Gęstość materiału	ρ_{sr}	kg/m^3	$53,14 \pm 0,04$	$26,60 \pm 0,04$
Rodzaj włókien	–	–	100% PES	100% PP
Średnia średnica włókien	g_{sr}	μm	$54,77 \pm 1,69$	$2,86 \pm 0,22$



**Tabela 5. cd.**

Parametr strukturalny	Symbol	Jednostka miary	Włóknina A	Włóknina K
Ogólna porowatość materiału	ϵ_{sr}	%	96,03 ± 0,003	97,08 ± 0,04
Główna frakcja porów	D_p	μm	147,79 ÷ 165,74	10,42 ÷ 12,65
Przeciętna wartość rozmiarów głównej frakcji porów	d_p	μm	160,47 ± 78,23	11,26 ± 3,87

W ramach oceny wykonano badania opory przepływu aerozolu i stężenia cząstek aerozolu cieczy „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym dla warunków doświadczalnych i rzeczywistych użytkowania wielostopniowego układu filtracji KA. Do obliczeń przyjęto wartości przedstawione w tabelach 6. i 7.

Tabela 6. Zestawienie warunków procesowych badań

Liczba zmiennych	Prędkość przepływu aerozolu m/s	Liczbowe stężenie wlotowe aerozolu cząstek/cm ³	Temperatura powietrza przepływającego °C	Rodzaj aerozolu testowego
1	$U_1 = 0,05$	$C_1 = 3,24 \cdot 10^6$	$T_1 = 20$	DEHS DOP
2	$U_2 = 0,10$	$C_2 = 2,95 \cdot 10^6$	$T_2 = 25$	
3	$U_3 = 0,15$	$C_3 = 1,90 \cdot 10^6$	$T_3 = 30$	
4	$U_4 = 0,20$	$C_4 = 9,80 \cdot 10^5$	$T_4 = 35$	

Tabela 7. Parametry obliczeniowe

Parametr obliczeniowy	Jednostka miary	Wartość założona
Stosunek $\frac{C_{0,dosw}}{C_{0,rzecz}}$	–	10 ³
Jednostkowa cena energii	PLN/kWh	0,2555
Sprawność mechaniczna wentylatora	%	100
Cena jednostki masy układu filtracji (netto)	PLN/m ²	70
Czas pomiarów doświadczalnych	min	120



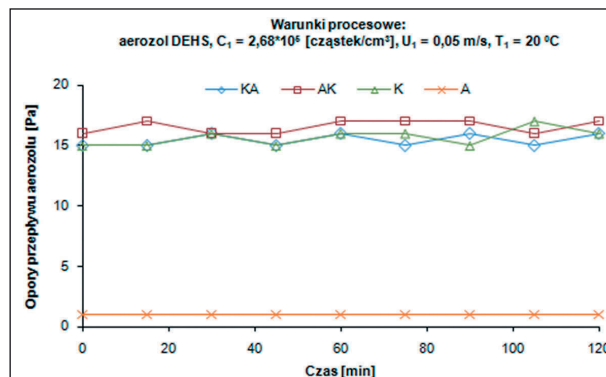


4.1. Ocena parametrów strukturalnych wielostopniowego układu filtracji

Wyniki badania relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy a parametrami strukturalnymi układów filtracji przedstawiono, odpowiednio, na rysunkach 12. i 13.

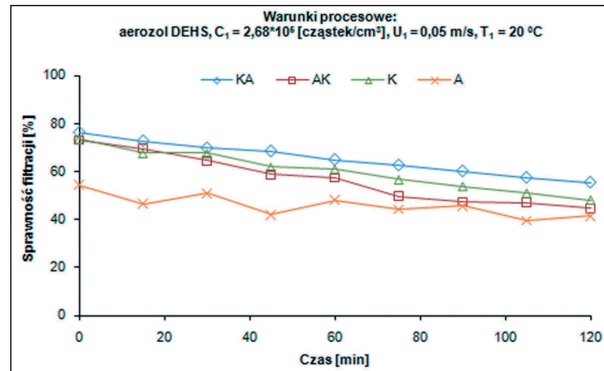
Z przedstawionych danych wynika, że:

- wzrost grubości warstwy filtrującej w wielostopniowym układzie powoduje wzrost początkowych oporów przepływu aerozolu cieczy (np. początkowe opory przepływu dla układu A wynoszą 1 Pa, a dla AK – 16 Pa)
- wzrost grubości warstwy filtrującej w wielostopniowym układzie filtracji nie zawsze determinuje wzrost początkowej sprawności filtracji (np. początkowa sprawność filtracji dla układu K wynosi 73,57%, a dla AK – 73,12%)
- opory przepływu wielostopniowych układów filtracji o różnych grubościach i porowatościach warstwy filtrującej nie ulegają praktycznie zmianie w czasie trwania procesu filtracji aerozoli cieczy (np. początkowe opory przepływu dla układu filtracji KA wynoszą 15 Pa, a końcowe – 16 Pa)
- sprawność filtracji w wielostopniowych układach filtracji o różnych grubościach i porowatościach warstwy filtrującej maleje w czasie trwania procesu filtracji aerozoli cieczy (np. początkowa sprawność układu filtracji KA wynosi 76,25%, a końcowa – 55,37 %)
- mniejsze początkowe opory przepływu aerozolu i większe wartości sprawności filtracji charakteryzują układy, w których warstwę czołową stanowią materiały włókninowe zawierające większe pory.



Rys. 12. Zmiany oporów przepływu aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji o różnej grubości i o różnej porowatości warstw czołowych





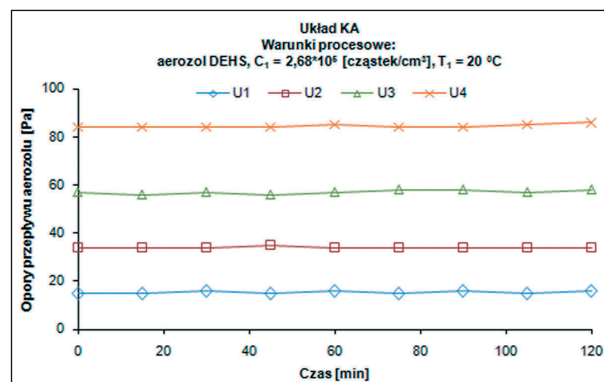
Rys. 13. Zmiany sprawności filtracji aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji o różnej grubości i o różnej porowatości warstw czołowych

4.2. Ocena parametrów procesowych obróbki mechanicznej

Wyniki badania relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozolu cieczy w układach filtracji a parametrami procesowymi obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych przedstawiono na rysunkach 14 ÷ 17.

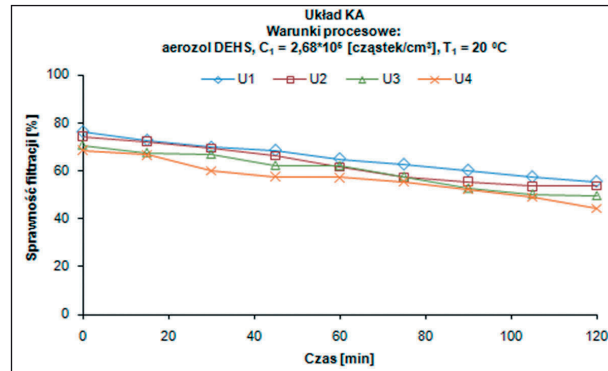
Z danych przedstawionych na rysunkach 14. i 15. wynika, że:

- wzrost prędkości przepływu aerozolu przez wielostopniowy układ powoduje:
 - wzrost początkowych oporów przepływu aerozolu cieczy (np. początkowe opory przepływu dla $U_1 = 0,05$ m/s wynoszą 15 Pa, a dla $U_4 = 0,20$ m/s są równe 84 Pa)
 - spadek początkowej sprawności filtracji (np. początkowa sprawność filtracji dla $U_1 = 0,05$ m/s wynosi 76,25%, a dla $U_4 = 0,20$ m/s to 68,57%)



Rys. 14. Zmiany oporów przepływu aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu cieczy





Rys. 15. Zmiany sprawności filtracji aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu cieczy

- ▶ opory przepływu wielostopniowych układów filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu nie ulegają zmianie w czasie trwania procesu filtracji (np. początkowe opory przepływu dla $U_1 = 0,05$ m/s wynoszą 15 Pa, a końcowe – 16 Pa)
- ▶ sprawność filtracji w układach filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu maleje w czasie trwania procesu filtracji aerozolu cieczy (np. początkowa sprawność układu filtracji KA dla $U_1 = 0,05$ m/s wynosi 76,25%, a końcowa – 55,37%).

Z przedstawionych danych (rys. 16. i 17.) dotyczących relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozolu cieczy w układach filtracji a wlotowym stężeniem aerozolu cieczy emitowanego podczas obróbki mechanicznej wynika, że:

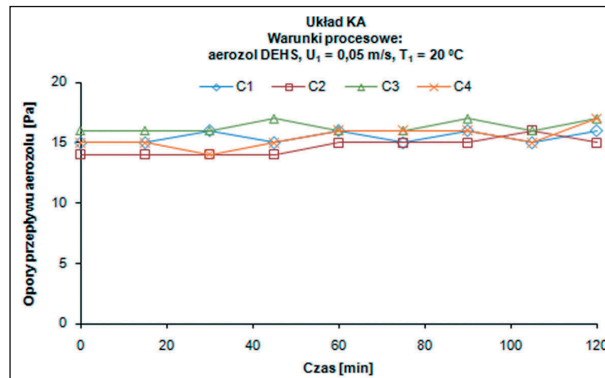
- ▶ wzrost wlotowego stężenia aerozolu nie wpływa na wzrost początkowych oporów przepływu aerozolu cieczy (np. początkowe opory przepływu dla $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$ cząstek/cm³ wynoszą 34 Pa, a dla $C_4 = 2,44 \cdot 10^6$ cząstek/cm³ – 32 Pa, przy prędkości przepływu aerozolu $U_2 = 0,10$ m/s)
- ▶ wzrost wlotowego stężenia aerozolu powoduje nieznaczny spadek:
 - ▶ początkowej sprawności filtracji (np. początkowa sprawność filtracji dla $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$ cząstek/cm³ wynosi 74,26%, a dla $C_4 = 2,44 \cdot 10^6$ cząstek/cm³ – 67,44%, przy prędkości przepływu aerozolu $U_2 = 0,10$ m/s)
 - ▶ współczynnika jakości filtra w funkcji wykładniczej (np. początkowy współczynnik QF dla $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$ cząstek/cm³ wynosi 0,040 1/Pa,



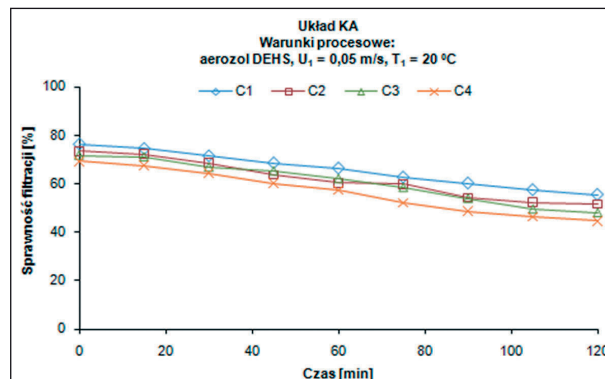


a dla $C_4 = 2,44 \cdot 10^6$ cząstek/cm³ – 0,036 1/Pa, przy prędkości przepływu aerozolu $U_2 = 0,10$ m/s)

- ▶ opory przepływu w układach filtracji w funkcji stężenia aerozolu nie ulegają praktycznie zmianie w czasie trwania procesu filtracji (np. początkowe i końcowe opory przepływu dla $U_1 = 0,05$ m/s i $C_4 = 2,44 \cdot 10^6$ cząstek/cm³ wynoszą 15 Pa)
- ▶ sprawność filtracji w układach filtracji w funkcji stężenia wlotowego aerozolu maleje w czasie trwania procesu filtracji aerozoli cieczy (np. początkowa sprawność układu filtracji KA dla $U_1 = 0,05$ m/s i $C_4 = 2,44 \cdot 10^6$ cząstek/cm³ wynosi 69,26%, a końcowa – 44,57%)
- ▶ różnica pomiędzy końcową sprawnością filtracji dla najmniejszego stężenia wlotowego aerozolu C_1 a największego stężenia C_4 wynosi ponad 10%.



Rys. 16. Zmiany oporów przepływu aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji w funkcji wlotowego stężenia liczbowego aerozolu cieczy



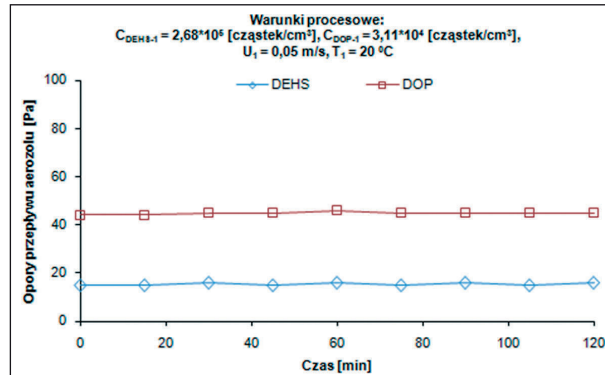
Rys. 17. Zmiany sprawności filtracji aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji w funkcji wlotowego stężenia liczbowego aerozolu cieczy



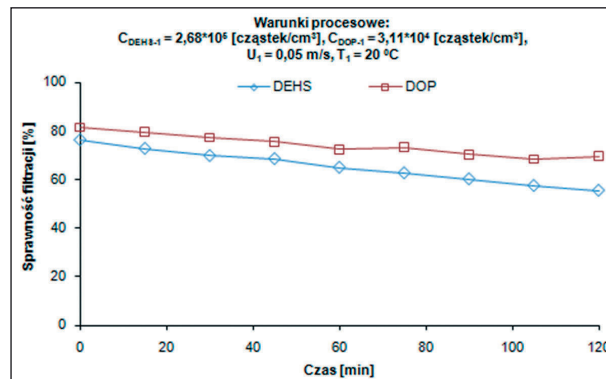


4.3. Ocena parametrów fizykochemicznych aerozoli cieczy

Wyniki badania relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy w układach filtracji a parametrami procesowymi obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych przedstawiono na rysunkach 18 ÷ 23.



Rys. 18. Zmiany oporów przepływu aerozolu w czasie w zależności od rodzaju aerozolu



Rys. 19. Zmiany sprawności filtracji aerozolu w czasie w zależności od rodzaju aerozolu

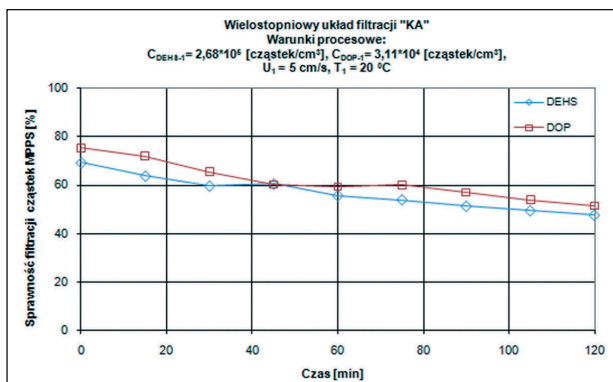
Z przedstawionych danych (rys. 18. i 19.) w relacji do rodzaju aerozolu wynika, że:

- ▶ rodzaj aerozolu ma wpływ na zróżnicowanie początkowych właściwości filtracyjnych:
 - ▶ zdecydowanie większe początkowe opory przepływu zaobserwowano przy przepływie aerozolu DOP, np. dla układu KA początkowe opory przepływu aerozolu DEHS wynoszą 15 Pa, a dla aerozolu DOP – 44 Pa)
 - ▶ nieznaczna różnica między sprawnościami filtracji aerozolu DEHS (76,25 ÷ 96,75%) i aerozolu DOP (81,36 ÷ 98,48%)

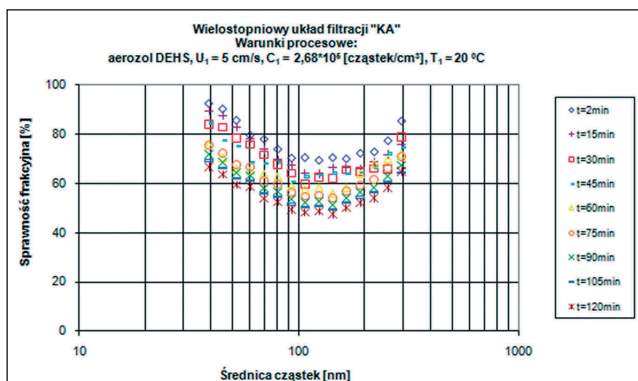




- opory przepływu różnych aerozoli cieczy przez wielostopniowe układy filtracji nie ulegają praktycznie zmianie w czasie trwania procesu filtracji aerozoli
- sprawność filtracji różnych aerozoli cieczy w wielostopniowych układach filtracji maleje w czasie trwania procesu filtracji.



Rys. 20. Zmiany sprawności filtracji cząstek MPPS aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji w zależności od rodzaju aerozolu testowego



Rys. 21. Zmiany sprawności filtracji w zależności od wymiarów cząstek aerozolu DEHS w czasie przez wielostopniowe układy filtracji

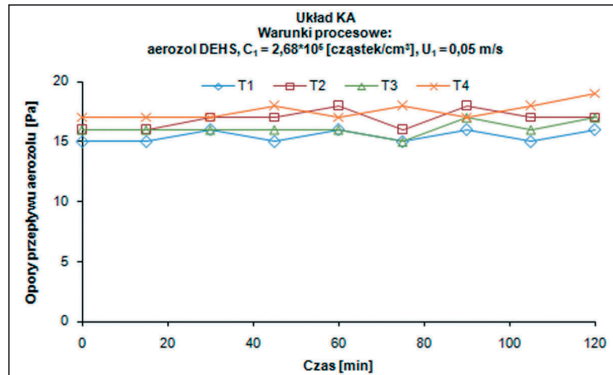
Z przedstawionych danych (rys. 20. i 21.) dotyczących relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy w wielostopniowych układach filtracji a wymiarami cząstek aerozolu cieczy emitowanego podczas obróbki mechanicznej wynika, że:

- sprawność filtracji cząstek najbardziej penetrujących MPPS maleje niezależnie od rodzaju aerozolu testowego w czasie trwania procesu filtracji aerozoli:

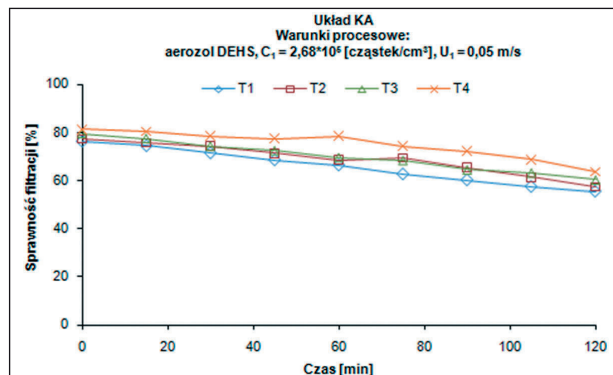




- ▶ aerozol DEHS: spadek sprawności filtracji cząstek MPPS w granicach $69,43 \div 47,58\%$
- ▶ aerozol DOP: spadek sprawności filtracji cząstek MPPS w granicach $75,49 \div 51,43\%$
- ▶ przebieg zmian sprawności filtracji w funkcji wymiarów cząstek aerozoli cieczy był podobny, tzn. spadek wartości sprawności dla cząstek mniejszych od cząstek MPPS, dla których sprawność filtracji przyjmowała wartość minimalną, a następnie wzrost sprawności filtracji wraz ze wzrostem wymiarów cząstek
- ▶ w ustalonych pozostałych warunkach procesowych zakres cząstek najbardziej penetrujących aerozolu DEHS wynosił $107 \div 143$ nm.



Rys. 22. Zmiany oporów przepływu aerozolu w czasie przez wielostopniowe układy filtracji w funkcji temperatury powietrza przepływającego wraz z zawieszonymi cząstkami aerozolu



Rys. 23. Zmiany sprawności filtracji aerozolu w czasie dla układów filtracji w funkcji temperatury powietrza przepływającego wraz z zawieszonymi cząstkami aerozolu cieczy





Z przedstawionych danych (rys. 22. i 23.) dotyczących relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu i sprawności filtracji aerozoli cieczy w wielostopniowych układach filtracji a temperaturą powietrza przepływającego wraz z zawieszonymi cząstkami aerozolu cieczy, emitowanego podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych, wynika, że:

- wzrost temperatury powietrza przepływającego przez układ pomiarowy nie wpływa znacząco na wzrost początkowych oporów przepływu aerozolu (np. początkowe opory przepływu przez układ KA dla $T_1 = 20\text{ °C}$ wynoszą 15 Pa, a dla $T_4 = 35\text{ °C}$ – 17 Pa, przy ustalonych pozostałych warunkach procesowych)
- wzrost temperatury powietrza przepływającego wraz z zawieszonymi cząstkami aerozolu cieczy powoduje nieznaczny wzrost początkowej sprawności filtracji (np. początkowa sprawność filtracji dla $T_1 = 20\text{ °C}$ wynosi 76,25%, a dla $T_4 = 35\text{ °C}$ – 81,22%, przy ustalonych pozostałych warunkach procesowych)
- opory przepływu wielostopniowych układów filtracji w funkcji temperatury powietrza przepływającego przez układ pomiarowy nie ulegają praktycznie zmianie w czasie trwania procesu filtracji w układzie KA (np. początkowe i końcowe opory przepływu dla $T_3 = 30\text{ °C}$ wynoszą 16 Pa, przy ustalonych pozostałych warunkach procesowych)
- sprawność filtracji w wielostopniowych układach filtracji w funkcji temperatury powietrza przepływającego przez układ pomiarowy maleje w czasie trwania procesu filtracji aerozoli cieczy (np. początkowa sprawność układu filtracji KA dla $T_3 = 30\text{ °C}$ wynosi 79,57%, a końcowa – 63,21%).

4.4. Ocena parametrów użytkowych

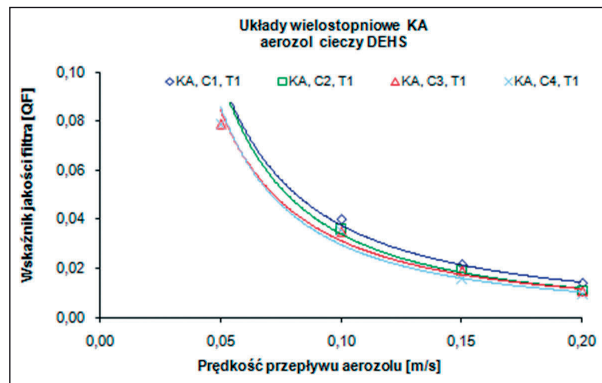
Poniżej podano przykładowe wyniki przebiegu wskaźnika QF i FUF, które charakteryzują jakość układu filtracji zarówno na etapie początkowym jak i w czasie jego eksploatacji.

Z przedstawionych danych (rys. 24.) wynika, że wzrost prędkości przepływu aerozolu cieczy przez wielostopniowy układ powoduje spadek wskaźnika jakości filtra w funkcji wykładniczej: $QF = 0,163 \cdot e^{-12,88U}$ (np. początkowy współczynnik QF dla $U_1 = 0,05\text{ m/s}$ wynosi 0,096, a dla $U_4 = 0,20\text{ m/s}$ to 0,014). Wzrost wlotowego stężenia aerozolu powoduje nieznaczny spadek



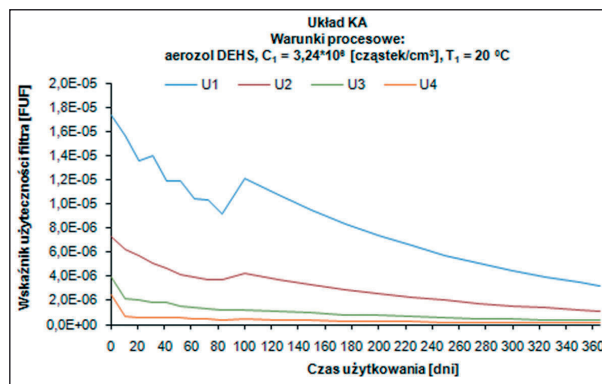


wskaźnika QF w funkcji wykładniczej: $QF = 0,069 \cdot e^{-1E-07C}$ (np. początkowy wskaźnik QF dla $C_1 = 3,24 \cdot 10^6$ cząstek/cm³ wynosi 0,040, a dla $C_4 = 9,80 \cdot 10^5$ cząstek/cm³ – 0,036, przy prędkości przepływu aerozolu $U_2 = 0,10$ m/s). Z kolei wzrost temperatury powietrza przepływającego wraz z zawieszonymi cząstkami aerozolu cieczy powoduje nieznaczny wzrost wskaźnika jakości filtra QF (np. początkowy współczynnik QF dla $T_1 = 20$ °C wynosi 0,096, a dla $T_4 = 35$ °C – 0,098, przy ustalonych pozostałych warunkach procesowych).



Rys. 24. Zestawienie wartości początkowych wskaźników jakości filtra QF dla wielostopniowych układów filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu cieczy

Zmiany wskaźnika użyteczności filtra FUF w czasie przewidywanego rzeczywistego użytkowania podczas obróbki mechanicznej przedstawione na rysunku 25. wskazują na spadek wartości w ciągu całego roku pracy układu filtracji. Analiza wykresów umożliwia również wskazanie optymalnego czasu użytkowania układów filtracji w rzeczywistych warunkach procesowych.



Rys. 25. Zmiany wskaźnika użyteczności filtra FUF w czasie rzeczywistego użytkowania dla wielostopniowych układów filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu cieczy





Obserwuje się chwilowe wzrosty wskaźnika FUF, ze szczególnym uwzględnieniem warunków procesowych (U_1 , U_2 , C_1 i T_1). Chwilowy wzrost FUF może mieć związek ze zmianą struktury układu, np.: KA, czyli odciekanie kropeł zatrzymanych wcześniej na warstwie wstępnej A i przemieszczanie się ich w niżej położone warstwy K układu, charakteryzujące się większą gęstością upakowania włókien. W przypadku np. układu filtracyjnego KA dla warunków procesowych (U_1 , C_1 i T_1) czas optymalny użytkowania filtra, czyli czas, po którym wskaźnik FUF gwałtownie maleje, wynosi 100 dni.





5. Podsumowanie

Przedstawione zasady oceny układów filtracji w procesach będących źródłem emisji cząstek aerozoli cieczy wynikają z zasad i norm przyjętych i obowiązujących w Polsce. Na potrzeby oceny układów filtracji podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych znormalizowane metody zostały rozszerzone o metody badawcze powstawania mgły olejowej w wyniku procesu dynamicznego i procesu termicznego oraz relacji pomiędzy zmianami oporów przepływu, sprawności filtracji aerozoli cieczy, wskaźnika jakości i użyteczności wielostopniowych układów filtracji a parametrami strukturalnymi włóknin, procesowymi obróbki i fizykochemicznymi aerozoli.

Ocena nowo projektowanych lub stosowanych rozwiązań wielostopniowych układów filtracji cząstek aerozoli cieczy emitowanych w procesach obróbki mechanicznej opiera się na wynikach badań przeprowadzonych w warunkach doświadczalnych i odniesionych do warunków rzeczywistego użytkowania. Celem badań jest potwierdzenie trafności doboru odpowiedniego układu filtracji lub zwiększenie sprawności układu filtracji już zamontowanego przy obróbce mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych pod kątem wyeliminowania lub zmniejszenia zagrożenia emisją aerozoli cieczy. W zależności od celu badań zaleca się stosowanie różnych metod badania, co w konsekwencji wymaga uwzględniania parametrów oceny, metod wytwarzania aerozoli cieczy, rodzaju aerozolu cieczy oraz parametrów technicznych przyrządów pomiarowych.

Podstawą do wspomaganego prognozowania zastosowania układu filtracji do zatrzymywania cząstek aerozoli cieczy, przy zachowaniu najkorzystniejszych warunków filtracji, tzn. wysokiej sprawności filtracji, niskich oporów przepływu i długiego czasu eksploatacji filtrów, jest realizacja sposobów postępowania zgodnie ze schematami blokowymi przedstawionymi na rysunkach 26. i 27.

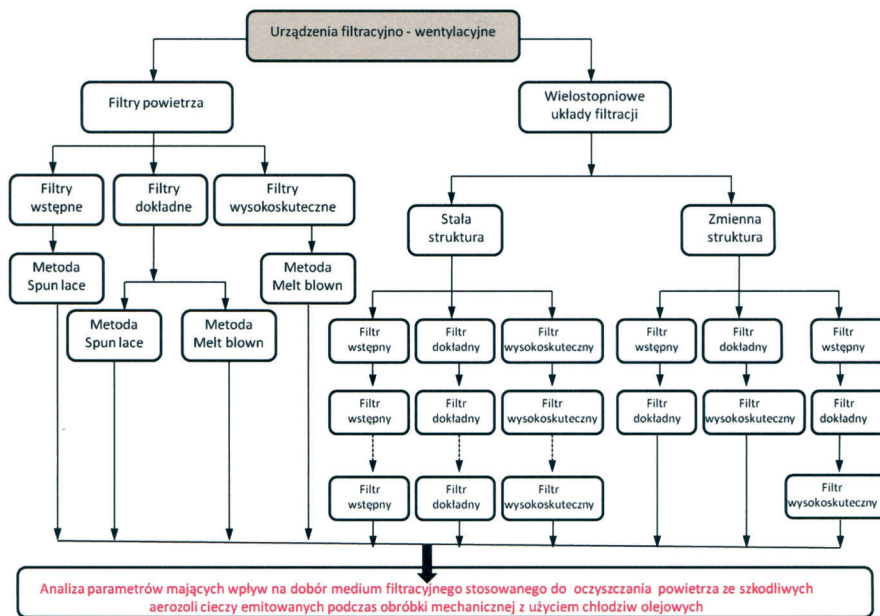
Schematy blokowe przygotowano na podstawie analizy danych literaturowych dotyczących zagrożeń aerozolami emitowanymi podczas obróbki





mechanicznej i badań wykonanych w CIOP-PIB na różnych wielostopniowych układach filtracji stosowanych w systemach wentylacji. W opracowanych schematach blokowych podczas doboru wielostopniowych układów filtracji podczas obróbki mechanicznej z użyciem olejowych chłodziw należy uwzględniać założenia odnośnie do wymagań związanych z obszarem działania maszyny, systemów wentylacji i układów filtracji aerozoli cieczy. Założenia dla działań dotyczących zmian organizacyjnych i technicznych w środowisku pracy podczas obróbki mechanicznej powinny być ukierunkowane na zapewnienie:

- prawidłowego działania maszyny
- efektywnego działania systemów wentylacyjnych
- wysokiej sprawności filtracji aerozoli cieczy w wielostopniowych układach filtracji.

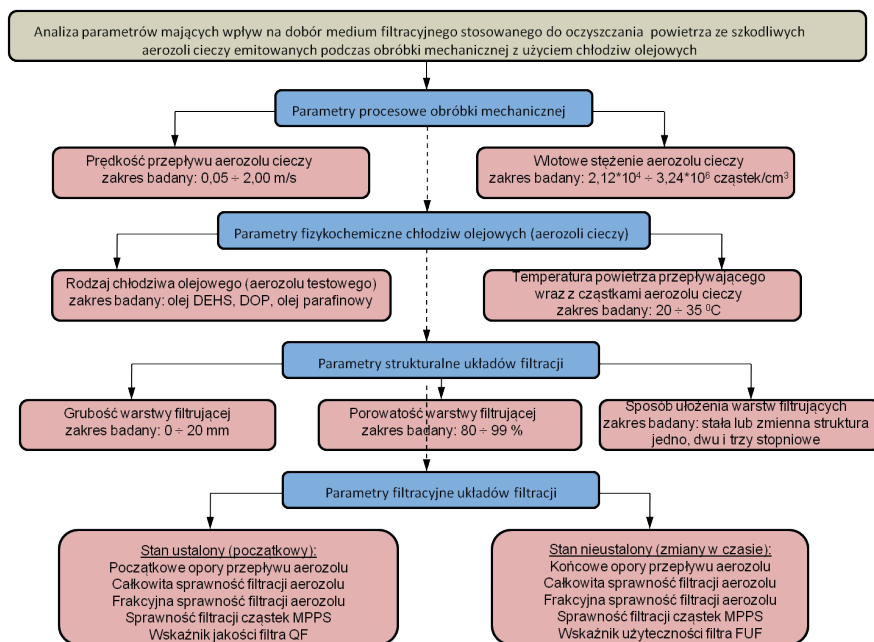


Rys. 26. Schemat postępowania podczas doboru układów filtracji do urządzenia filtracyjno-wentylacyjnego stosowanego przy obróbce mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych

Wyniki uzyskane podczas badań z użyciem przedstawionych charakterystyk parametrów oceny i metod ich badania mogą zostać wykorzystane w procesach obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych jako narzę-



dzie do wspomagania prognozowania zastosowania wielostopniowych układów filtracji do zatrzymywania cząstek aerozoli cieczy.



Rys. 27. Schemat postępowania podczas doboru parametrów oceny układów filtracji

Z kolei poprzez określenie wskaźników jakości i użyteczności projektowanych lub stosowanych wielostopniowych układów filtracji można uwzględnić rzeczywiste koszty inwestycyjne i operacyjne ponoszone przez użytkowników systemów wentylacji, wynikające z zastosowania danej aplikacji.



6. Bibliografia

1. Agranovski I.E., Boskovic L., Altman I.S., Braddock R.D., Myojo T., Choi M. (2006) *Filtration of Particles with Different Shapes on Fibrous Filters*. [W:] Proceedings book of the Seventh International Aerosol Conference, 10-15 September 2006. St. Paul, Minnesota, USA, pp. 328-329.
2. Brown R.C. (1993) *Air filtration*. Pergamon.
3. Clement C. F., Dunnett S.J. (2004) *A study of the effect of deposition on fibrous filter efficiency*. Journal of Aerosol Science, vol. II, pp. 771-772.
4. Grimm GmbH (1994) *Instruction Manual. The Micro-flow Porometer Grimm 4.900*.
5. Jankowska E. (2005) *Skuteczność filtracji cząstek nanometrycznych przez materiały filtracyjne*. Bezpieczeństwo Pracy 9 (410), s. 9-11.
6. Kałużka J., Jankowska E., Pośniak M., Ławniczak D. (2010) *Testing the Efficiency of the Simultaneous Air Cleaning of Dust and Gases by Fibrous Filtering and Sorptive Structures*. Fibres & Textiles in Eastern Europe, Vol. 18, No. 4 (81), s. 77-81.
7. Kijeńska D. (2000) *Oleje mineralne – metody oznaczania*. Bezpieczeństwo Pracy 11, s. 24-25.
8. Mączka I., Kałużka J., Jankowska E., Polus Z. (2010) *Kompozyty włókninowe do filtracji dokładnej. Cz. I. Przegląd Włókienniczy WOS*, No 5, s. 43-45.
9. Mullins B.J., Agranovski I.E., Braddock R.D. (2003) *Particle bounce filtration of particles on wet and dry filters*. Aerosol Science and Technology, vol. 37, pp. 1-14.
10. Mullins B.J., Agranovski I.E., Braddock R.D. (2004) *Simultaneous capture of two types of aerosol (water/oil and solid/water) on fibrous filters*. Journal of Aerosol Science, vol. II, pp. 1239-1240.
11. Mullins B.J., Kasper G. (2005) *Filtration of oil mists – Maximising drainage from media*. [W:] Proceedings book of the European Aerosol Conference, Ghent, Belgium. pp. 274-275.





12. Podgórski, A., Jackiewicz, A. (2008) *Filtration of aerosol particles in polydisperse fibrous filters. I – Models formulation*. [W:] Proceedings book of abstracts of EAC2008, Saloniki, Grecja, 2008.
13. TSI Incorporated (1996) *Instruction Manual. Model 3936 Scanning Mobility Particle Sizer*.
14. Volckens J., Boundy M., Leith D. (2000) *Mist concentration measurements II: Laboratory fields evaluations*. Applied Occupational and Environmental Hygiene, vol. 15(4), pp. 370-379.
15. Willeke K., Baron P. A. (2001) *Aerosol measurement. Principles, Techniques and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.

16. *Dyrektywa 89/391/EWG z 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu zwiększania bezpieczeństwa i poprawy zdrowia pracowników podczas pracy*. DzU L 183 z 29.6.1989, s. 1-8.
17. *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)*. DzU L 131 z 5.5.1998, s. 11-23.
18. *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/104/WE z dnia 16 września 2009 r. dotycząca minimalnych wymagań w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny użytkowania sprzętu roboczego przez pracowników podczas pracy (druga dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG)*. DzU L 260 z 3.10.2009, s. 5-19.
19. *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.* DzU 2005, nr 66, poz. 574.
20. *Obwieszczenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 28 sierpnia 2003 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy*. DzU 2003, nr 169, poz. 1650.
21. *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.*
DzU 2002, nr 191, poz. 1596.
22. PN-EN 779:2012 *Przeciwpyłowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Określanie parametrów filtracyjnych.*
 23. PN-EN 1822-1:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA, ULPA). Cz. 1: Klasyfikacja, badanie parametrów, znakowanie (oryg.).*
 24. PN-EN 1822-2:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Cz. 2: Wytwarzanie aerozolu, przyrządy pomiarowe, statystyka zliczania cząstek (oryg.).*
 25. PN-EN 1822-3:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Cz. 3: Badanie płaskiego materiału filtracyjnego (oryg.).*
 26. PN-EN 1822-4:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Cz. 4: Określanie przecieku filtru (metoda przeszukiwania) (oryg.).*
 27. PN-EN 1822-5:2009 *Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA). Cz. 5: Określanie skuteczności filtru (oryg.).*
 28. PN-EN ISO 9073-2:2002 *Tekstyliia. Metody badania włóknin. Cz. 2: Wyznaczanie grubości.*

