

# Badania wpływu porowatości materiałów filtracyjnych na proces filtracji aerozoli cieczy

mgr inż. TOMASZ JANKOWSKI  
Centralny Instytut Ochrony Pracy  
– Państwowy Instytut Badawczy

Włókninowe materiały filtracyjne znajdują szerokie zastosowanie w filtrach powietrza systemów wentylacji. Prognozowanie zastosowania filtrów powietrza do ochrony człowieka powinno uwzględniać zachowanie najkorzystniejszych warunków filtracji cząstek aerozoli przy zróżnicowaniu stężeń aerozoli obecnych w środowisku pracy oraz różnych prędkościach przepływu aerozolu w systemach wentylacji. W artykule przedstawiono wyniki badania oporów przepływu i skuteczności w procesie filtracji cząstek aerozolu cieczy przez włókninowe materiały filtracyjne, w aspekcie lokalnych zmian wielkości porów we włókninach.

## Research on the influence of the porosity of filtering materials on the filtration process of liquid aerosols

Needled nonwovens are an important part of fibrous filters used in ventilation systems. When planning the use of fibrous filters to protect the human in the working environment, it is necessary to maintain optimal conditions for filtering liquid aerosol particles at different concentrations and velocities in ventilation systems. This article presents some aspects of the influence of the porosity of filtration materials on the efficiency of the filtration process through needed nonwovens.

## Wstęp

Ochrona człowieka w środowisku pracy, zmierzająca do ograniczenia lub eliminowania zagrożenia cząstkami aerozoli, które deponują się w układzie oddechowym człowieka, powinna być realizowana przede wszystkim przez stosowanie filtrów powietrza w systemach wentylacji. Szczególne znaczenie ma ochrona pracowników w odniesieniu do cząstek aerozoli cieczy z frakcji respirabilnej [1].

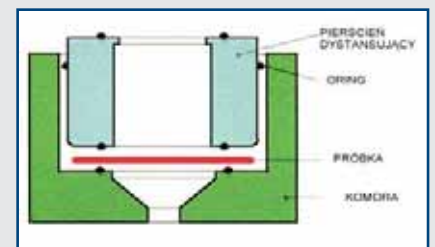
Narażenie na aerozole cieczy może powodować powstawanie takich jednostek chorobowych, jak np.: przewlekłe zapalenie oskrzeli, astma, alergiczne zapalenie płuc, a także rozwój nowotworów wśród pracowników zatrudnionych w przetwórstwie przemysłowym.

Materiały filtracyjne pozwalają nie tylko na dogodne regulowanie grubości filtru, ale również na dobór odpowiedniej struktury w przekroju filtru, w celu uzyskania najbardziej efektywnego oczyszczenia powietrza z polidispersyjnego aerozolu cieczy. Jednym z najważniejszych zjawisk

decydujących o dobrych właściwościach filtracyjnych takich układów jest oddziaływanie cząstek aerozoli z włóknami stanowiącymi warstwę filtracyjną. Podstawowymi parametrami opisującymi proces filtracji aerozoli cieczy są opory przepływu i skuteczność filtracji [2-5]. Przebieg procesu filtracji jest charakteryzowany przez złożone mechanizmy transportu i depozycji cząstek aerozoli. Zmiany parametrów filtracyjnych włókien zależą od wymiarów geometrycznych włókien oraz grubości i porowatości włókniny.

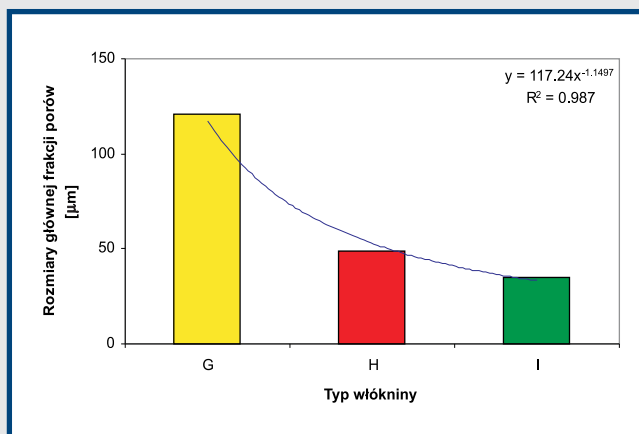
W przypadku włókien filtracyjnych o tej samej strukturze, mimo iż porowatość filtru praktycznie rzecz biorąc nie ulega zmianie w jego przekroju poprzecznym, to jednak wzrost grubości filtru wpływa na efekt odfiltrowywania cząstek aerozolowych, w wyniku wzrostu długości krętych kanałików, jakie tworzą włókna, co powoduje zintensyfikowanie działania różnych zjawisk odpowiedzialnych za proces filtracji. Widoczny i zadowalający efekt filtracji można zauważyć dopiero poniżej pewnej

krytycznej wartości stosunku wielkości porów włókniny do wielkości cząstek aerozolu. Poniżej tej wartości charakterystyka skuteczności filtracji materiału filtracyjnego, wraz ze wzrostem grubości struktury powinna się zmieniać wraz ze zmianą tego stosunku. Wynika to z faktu, iż cechą charakterystyczną włókninowych materiałów filtracyjnych jest to, że mogą one odfiltrowywać cząstki znacznie mniejsze od rozmiarów porów. Efekt filtracji zależy

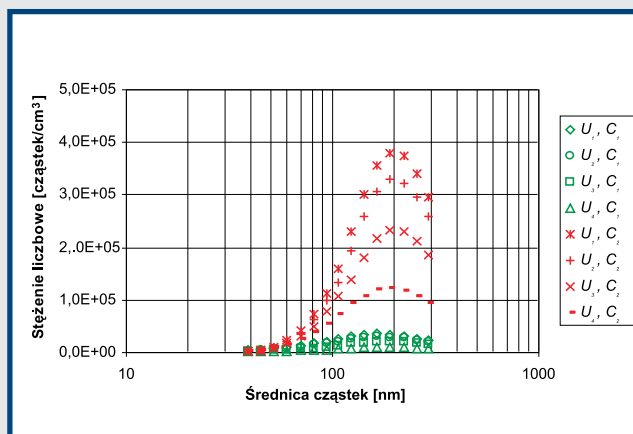


Rys. 1. Schemat umieszczenia próbki w porometrze kapilarnym

Fig. 1. Diagram of a capillary flow porometry test



Rys. 2. Charakterystyka rozmiarów głównej frakcji porów dla badanych włókien  
Fig. 2. Largest pore size distribution of tested nonwovens



Rys. 3. Rozkład wielkości cząstek aerozolu DEHS o różnych stężeniach wlotowych  
Fig. 3. Size distribution of the liquid aerosol for different concentrations

tu od bardzo wielu czynników (w odniesieniu już tylko do samych włókien można wyliczyć kilkanaście), ale przy zachowaniu ich stałości, także w znacznym stopniu od grubości filtru.

W artykule omówione zostały wyniki badania oporów przepływu i skuteczności w początkowym etapie filtracji cząstek aerozolu DEHS przez włókninowe materiały filtracyjne, w aspekcie lokalnych zmian wielkości porów we włókninach.

Wyniki badań zostały przedstawione w postaci korelacji zmian parametrów filtracyjnych w początkowym etapie procesu filtracji, w odniesieniu do materiałów filtracyjnych o różnej grubości i jednolitej strukturze w przekroju włókniny.

Do celów badawczych wprowadzono pojęcie wskaźnika porowatości materiału filtracyjnego opisanego jako stosunek średnicy cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) aerozolu cieczy do rozmiarów porów frakcji głównej we włókninie.

Wskaźnik ten określa relacje między dwiema grupami parametrów, związanych z charakterystyką czynnika penetrującego włókninę (aerozol cieczy) oraz charakterystyką medium filtracyjnego (włókninowy materiał filtracyjny), reprezentowanych odpowiednio przez:

- rozmiar cząstek MPPS aerozolu cieczy, w odniesieniu do której skuteczność filtracji osiąga wartości minimum
- rozmiar porów stanowiących większościowy udział w strukturze włókniny.

## Materiał i metoda badań

Wykonano badania trzech komercyjnych włókien z włókien wytworzonych z polimerów syntetycznych. Podstawowe parametry strukturalne badanych włókien przedstawiono w tabeli 1.

Doświadczalną analizę porowatości włókien przeprowadzono z użyciem porometru kapilarnego Model 4.900 (Porous Materials, Inc., USA) Przyrząd pozwala na scharakteryzowanie porowatości włókien w zakresie wielkości porów od 0,013 do 500 µm

Tabela 1

### CHARAKTERYSTYKA STRUKTURALNA BADANYCH WŁÓKNIN

#### Structural parameters of filter nonwovens

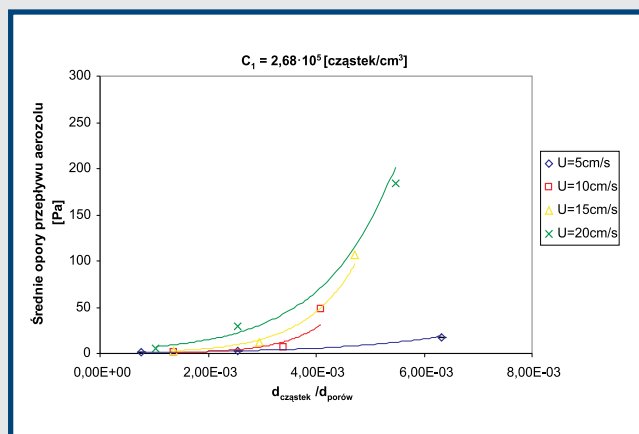
Parametr strukturalny	Symbol	Jednostka miary	Liczba warstw układu włókniny		
			G	H	I
Grubość układu	L	mm	4,32 ± 0,00	6,44 ± 0,01	2,08 ± 0,00
Masa powierzchniowa układu	M <sub>p</sub>	g/m <sup>2</sup>	303,75 ± 0,00	295,18 ± 0,00	534,33 ± 0,00
Gęstość upakowania włókniny	ρ	kg/m <sup>3</sup>	73,34 ± 4,85	51,10 ± 4,90	273,98 ± 4,21
Średnia średnica włókien	g	µm	54,77 ± 1,95	18,06 ± 0,73	16,52 ± 0,54
Ogólna porowatość układu	ε	%	94,75 ± 0,34	96,51 ± 0,70	80,76 ± 1,44

Tabela 2

### CHARAKTERYSTYKA WIELKOŚCI FRAKCJI GŁÓWNEJ PORÓW BADANYCH WŁÓKNIN

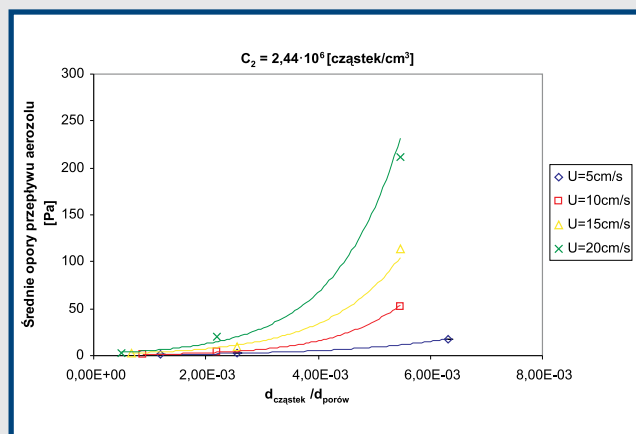
#### Mean flow pore size and maximum pore size of tested nonwovens

Parametr porowatości	Symbol	Jednostka miary	Typ materiału filtracyjnego		
			G	H	I
Główna frakcja porów	D	µm	111,81 ÷ 147,55	44,15 ÷ 64,86	32,61 ÷ 39,58
Przeciętna wartość rozmiarów głównej frakcji porów	d <sub>p</sub>	µm	120,92 ± 88,05	48,59 ± 7,93	34,95 ± 12,23



Rys. 4. Zmiany średnich oporów przepływu aerozolu w funkcji stosunku średnicy cząstek MPPS do wielkości porów frakcji głównej dla włókien, przy stężeniu wlotowym aerozolu  $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$  cząstek/cm<sup>3</sup>

Fig. 4. Effect of MPPS particles size/largest pore size ratio on the flow resistance for aerosol concentration  $C_1$



Rys. 5. Zmiany średnich oporów przepływu aerozolu w funkcji stosunku średnicy cząstek MPPS do wielkości porów frakcji głównej dla włókien, przy stężeniu wlotowym aerozolu  $C_2 = 2,44 \cdot 10^6$  cząstek/cm<sup>3</sup>

Fig. 5. Effect of MPPS particles size/largest pore size ratio on the flow resistance for aerosol concentration  $C_2$

z niepewnością odczytu 0,15%. Na rys. 1. (str. 20.) przedstawiono schematycznie uchwyt próbki włókniny wewnątrz porometru kapilarnego.

Zasada działania porometru kapilarnego opiera się na zjawisku zwilżania powierzchni ciała stałego przez ciecz. W badaniach została wykorzystana specjalna, nietoksyczna ciecz „Porewick”, która ma bardzo małą wartość swobodnej energii powierzchni i niską prężność par.

Metoda doświadczalna pozwala na wyznaczenie (tab. 2. i rys. 2., str. 21.):

- wymiarów największych porów
- zakresu głównej frakcji porów
- przeciętnej wartości rozmiarów głównej frakcji porów
- krzywej charakteryzującej udziały frakcji porów o określonym zakresie wielkości.

Metoda badania charakterystyki zmian parametrów filtracyjnych włókien przedstawiona została we wcześniejszych publikacjach [6, 7].

Badanie oporów przepływu i skuteczności filtracji cząstek aerozolu DEHS w przedziale średnic od 40 do 300 nm we włókninach, wykonano w odniesieniu do czterech prędkości przepływu ( $U_1 = 5$  cm/s,  $U_2 = 10$  cm/s,  $U_3 = 15$  cm/s,  $U_4 = 20$  cm/s) przez materiał filtracyjny.

Uwzględniając zróżnicowanie stężeń aerozoli cieczy obecnych w środowisku pracy, przyjęto dwie wartości stężenia wlotowego aerozolu ( $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$  cząstek/cm<sup>3</sup>

i  $C_2 = 2,44 \cdot 10^6$  cząstek/cm<sup>3</sup>). Rozkład wielkości cząstek aerozolu DEHS podawanego na badane włókniny przedstawiono odpowiednio na rys. 3. (str. 21.).

Stężenia wlotowe aerozolu mają charakter nominalny, gdyż przy zwiększaniu prędkości liniowych powietrza następuje naturalne rozcieńczenie układu. Dzięki temu przy większych prędkościach przepływu aerozolu rzeczywiste stężenie cząstek napływających na materiał filtracyjny jest proporcjonalnie mniejsze.

## Wyniki badań

Na podstawie uzyskanych wyników badania zmian średnich oporów przepływu aerozolu w zależności od stosunku ( $\zeta = d_{\text{cząstek}}/d_{\text{porów}}$ ) średnicy cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) do wielkości porów frakcji głównej we włókninach (rys. 4. i 5.) można stwierdzić, że wartość tych relacji ma istotny wpływ na charakterystykę zmian oporów przepływu aerozolu cieczy. Dla wszystkich włókien opory przepływu rosną wraz ze wzrostem stosunku  $\zeta$ .

Zależność oporów od stosunku  $\zeta$  miała charakter funkcji wykładniczej:

$$\Delta p_t = A \cdot e^{B \cdot \zeta}$$

gdzie:

$\Delta p_t$  – opory przepływu powietrza [Pa]

$\zeta$  – stosunek średnicy cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) do wielkości porów frakcji głównej we włókninie

A – wartość stała

B – stała zależna od szybkości wzrostu oporów przepływu aerozolu.

Uzyskane wyniki badań zmian początkowych skuteczności filtracji cząstek MPPS aerozolu w zależności od stosunku ( $\zeta$ ) średnicy cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) do wielkości porów frakcji głównej we włókninach (rys. 6. i 7.) wskazują, że w odniesieniu do wszystkich badanych włókien skuteczności filtracji rosną wraz ze wzrostem stosunku  $\zeta$ .

Zmiany skuteczności filtracji włókien dla wszystkich prędkości przepływu powietrza wykazywały charakter funkcji potęgowej:

$$E_{MPPS} = c \cdot \zeta^n$$

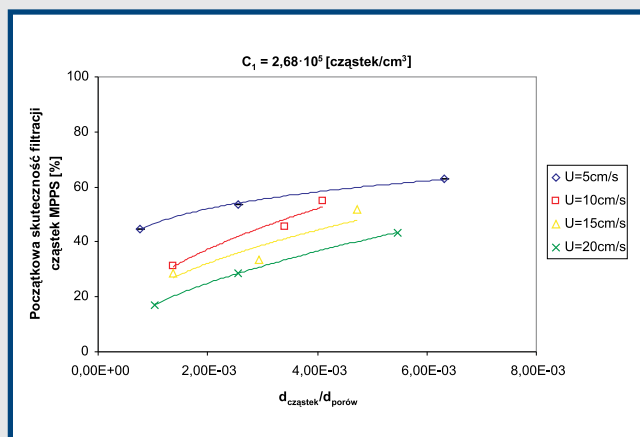
gdzie:

$E_{MPPS}$  – skuteczność filtracji cząstek najbardziej penetrujących przez włókninę (%)

c – współczynnik kierunkowy

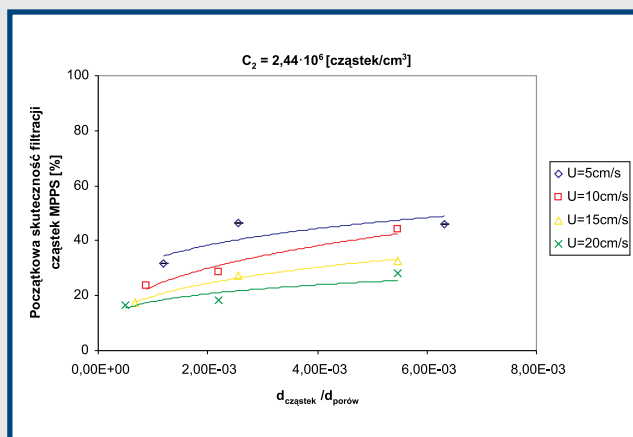
n – wykładnik potęgowy.

Dla wszystkich prędkości przepływu powietrza współczynnik korelacji ( $R^2$ ) był przeważnie większy od 0,98. Świadczy to o wysokim związku korelacyjnym dla wszystkich badanych włókien. Związek ten był tym większy im większa była prędkość przepływu aerozolu, a mniejsze stężenie wlotowe aerozolu cieczy.



Rys. 6. Zmiany początkowych skuteczności filtracji cząstek MPPS w funkcji stosunku średnicy cząstek MPPS do wielkości porów frakcji głównej dla włókien, przy stężeniu wlotowym aerozolu  $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$  cząstek/cm<sup>3</sup>

Fig. 6. Effect of MPPS particles size/largest pore size ratio on the initial filtration efficiency for aerosol concentration  $C_1$ .



Rys. 7. Zmiany początkowych skuteczności filtracji cząstek MPPS w funkcji stosunku średnicy cząstek MPPS do wielkości porów frakcji głównej dla włókien, przy stężeniu wlotowym aerozolu  $C_2 = 2,44 \cdot 10^6$  cząstek/cm<sup>3</sup>

Fig. 7. Effect of MPPS particles size/largest pore size ratio on the initial filtration efficiency for aerosol concentration  $C_2$ .

Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 4–7 wskazuje na to, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu aerozolu zwiększa się wpływ relacji między wielkością porów a rozmiarami cząstek MPPS aerozolu na właściwości filtracyjne włókien.

Wzrost prędkości przepływu aerozolu DEHS w zakresie od 5 cm/s do 15 cm/s powodował przyrost całkowitej skuteczności filtracji o:

- 41% (dla  $U = 5$  cm/s) i 83% (dla  $U = 15$  cm/s), przy stężeniu wlotowym aerozolu  $C_1 = 2,68 \cdot 10^5$  cząstek/cm<sup>3</sup>

- 44% (dla  $U = 5$  cm/s) i 89% (dla  $U = 15$  cm/s), przy stężeniu wlotowym aerozolu  $C_2 = 2,44 \cdot 10^6$  cząstek/cm<sup>3</sup>.

Trzykrotny wzrost prędkości przepływu aerozolu spowodował 2-krotnie większy wzrost całkowitej skuteczności filtracji cząstek aerozolu najbardziej penetrujących (MPPS) dla obydwu wartości wlotowego stężenia aerozolu oleju DEHS.

## Podsumowanie

Na podstawie wyników badań doświadczalnych można wnioskować, że metoda oceny w odniesieniu do wskaźnika porowatości charakteryzującego relacje między rozmiarami cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) i wielkości porów frakcji głównej może być stosowana do określania

charakterystyk zmian parametrów filtracyjnych włókien.

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ udziału porów frakcji głównej włókien oraz rozmiarów cząstek MPPS aerozolu cieczy na zmianę parametrów filtracyjnych materiałów zbudowanych z włókien wytworzonych z włókien syntetycznych.

Ilościowe zmiany parametrów filtracyjnych badanych włókien zależą od stosunku średnicy cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) do rozmiarów porów frakcji głównej we włókninie.

Główną przyczyną wzrostu wartości oporów przepływu aerozolu cieczy w materiałach filtracyjnych jest zwiększenie udziału porów o mniejszych wymiarach. Konsekwencją zwiększającej się gęstości upakowania włókniny jest wzrost minimalnej wartości skuteczności filtracji w odniesieniu do cząstek MPPS. Minimum skuteczności frakcyjnej występuje dla coraz większych rozmiarów cząstek MPPS aerozolu cieczy.

Dzięki przedstawionej metodzie badania można wspomagać działania zmierzające do dopasowywania właściwej włókniny filtracyjnej do konkretnego aerozolu cieczy i przez to lepiej realizować proces filtracji.

Włóknina taka powinna charakteryzować się wysoką skutecznością filtracji, a także małymi oporami przepływu. Podczas eksploatacji takiej włókniny, opory przepływu

nie powinny wzrastać zbyt szybko, a skuteczność filtracji powinna być nie gorsza niż początkowa.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] W. Albrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann *Nonwoven fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes*. Wiley-VCH, Weinheim 2002
- [2] K.R. Spurny *Advances in aerosol filtration*. Lewis Publishers, 1998
- [3] A. Bałazy, A. Podgórski *The influence of the filtration conditions on the optimisation of aerosol filtration in fibrous filters*. "Journal of Aerosol Science", vol. II, 969-970, 2004
- [4] L. Gradoń, T. Ciach *Deep bed filtration of liquid suspensions in the multilayer fibrous structures*. <http://www.microspun.pl/img/df3cc61c.doc>, 2001
- [5] K. Willeke, P.A. Baron *Aerosol measurement. Principles, Techniques and Applications*. Van Nostrand Reinhold, 1993
- [6] E. Jankowska *Skuteczność filtracji cząstek nanometrycznych przez materiały filtracyjne*. „Bezpieczeństwo Pracy” 9(410)2005, 9
- [7] T. Jankowski *Skuteczność filtracji cząstek aerozoli przez warstwowe układy włókien filtracyjnych*. „Bezpieczeństwo Pracy” 10(421)2006, 28-31

Publikacja opracowana na podstawie wyników zadania badawczego zrealizowanego w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego