

ANNA JACKIEWICZ
ALBERT PODGÓRSKI

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

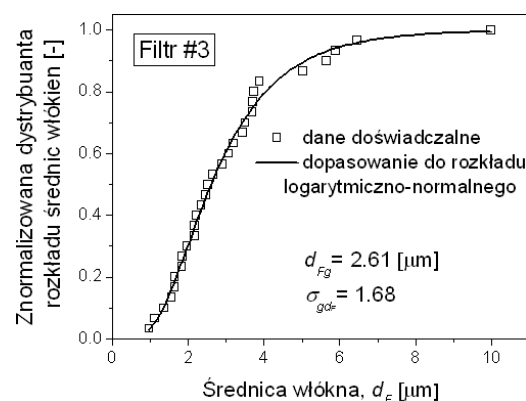
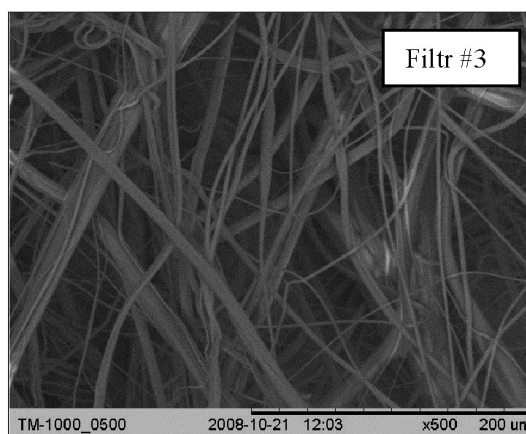
Czy średnia średnica włókna stanowi wystarczającą informację by poprawnie przewidzieć sprawność filtra?

Wstęp i metodyka doświadczalna

Dzięki filtrom włókninowym można efektywnie usunąć nawet bardzo drobne cząstki z gazów przy względnie niskich spadkach ciśnienia. Na sprawność tych filtrów istotny wpływ ma ich niehomogeniczna struktura, tzn. polidispersyjny rozkład średnic włókien i nierównomierny rozkład porowatości w przestrzeni. Ta złożona wewnętrzna struktura geometryczna filtra powoduje, iż proces filtracji aerozoli w filtrach włókninowych jest trudny do opisu. Klasyczna teoria filtracji wgłębszej aerozoli w filtrach włókninowych opracowana została dla wyidealizowanej struktury filtracyjnej złożonej z włókien o jednakowej średnicy, równomiernie rozmieszczonych w przestrzeni, co implikuje przyjęcie założenia o identycznej sprawności dla wszystkich włókien. Jest to dość restrykcyjne założenie, stanowiące zwykle zbyt daleko posunięte uproszczenie w odniesieniu do rzeczywistych filtrów włókninowych, które są zazwyczaj mniej lub bardziej polidispersyjne. Ponadto, nie jest wcale oczywiste, w jaki sposób tę klasyczną teorię można by rozszerzyć na przypadek realnych, niehomogenicznych struktur włókninowych. Powszechnie stosowana, choć nie mająca teoretycznego uzasadnienia metodą, jest użycie w klasycznych równaniach dla włókien monodispersyjnych średniej średnicy włókna (np. średniej arytmetycznej, geometrycznej, kwadratowej) lub średnicy równoważnej wyznaczanej ze spadków ciśnienia. W ramach niniejszej pracy przeanalizowano, czy stosując takie proste podejście można dokładnie opisać eksperymentalnie wyznaczone penetracje cząstek aerozolowych przez polidispersyjny filtr włókninowy. Okazało się, że jest ono jednak niewystarczające. Dlatego też zaproponowano nowy ogólny model uwzględniający rzeczywisty rozkład średnic włókien – model przepływu częściowo segregowanego, *PSFM (Partially Segregated Flow Model)*. Przebadano osiem polipropylenowych filtrów włókninowych wykonanych techniką rozdmuchu stopionego polimeru. Penetrację frakcyjną submikronowych i mikronowych cząstek aerozolowych oraz spadki ciśnienia przez badane filtry wyznaczono doświadczalnie wykorzystując modułowy system do testowania płaskich materiałów filtracyjnych (*Palas MFP-2000*). Pomiaru wykonano dla czterech prędkości przepływu powietrza przez filtry: $U_0 = 0,08; 0,12; 0,15$ i $0,2$ m/s.

Dyskusja wyników i wnioski

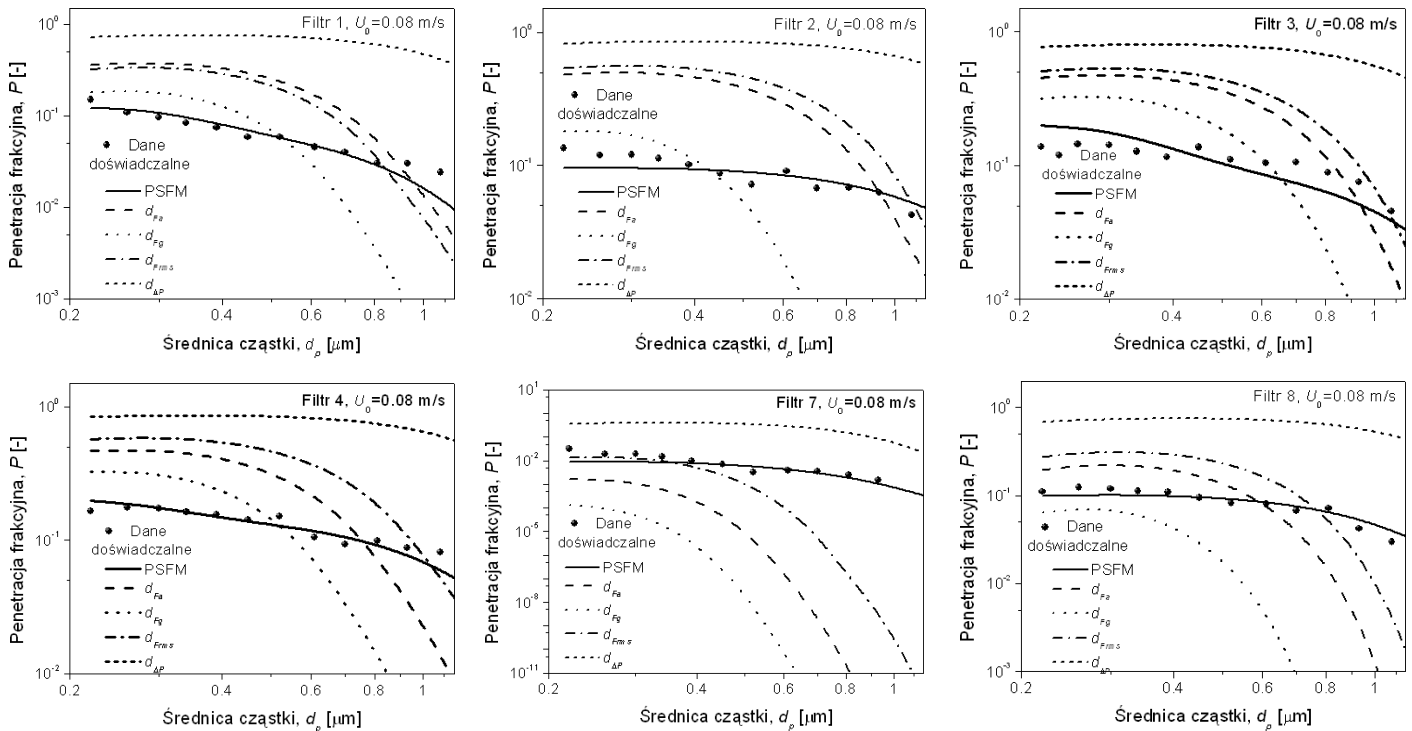
Przeanalizowano zdjęcia próbek włókien wykonane za pomocą mikroskopu elektronowego i stwierdzono iż, badane filtry są złożone z włókien o różnych średnicach. Otrzymane



Rys. 1. Zdjęcie mikroskopowe SEM oraz znormalizowana dystrybuanta rozkładu średnic włókien filtra #3

Tablica 1
Strukturalna charakterystyka badanych filtrów

Filtr	d_{Fa} [μm]	d_{Fg} [μm]	σ_{gdF} [-]	$d_{\Delta P}$ [μm]	$d_{F_{rms}}$ [μm]	α [-]	L [mm]
1	2,55	1,98	1,58	4,71	2,43	0,016	3,5
2	2,91	1,91	2,04	5,82	3,18	0,024	2,0
3	3,15	2,61	1,68	5,72	3,42	0,030	1,9
4	2,33	1,90	1,81	4,97	2,69	0,024	1,3
5	2,06	1,46	1,80	5,01	2,06	0,019	5,6
6	1,53	1,22	1,82	4,66	1,75	0,027	5,1
7	1,72	1,47	1,82	4,40	2,09	0,023	6,4
8	3,63	2,78	1,87	8,04	4,11	0,039	3,7



Rys. 2. Porównanie penetracji wyznaczonych doświadczalnie z obliczonymi dla sześciu badanych filtrów dla prędkości 0,08 m/s

rozkłady ich średnic włókien precyzyjnie opisano za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego, (Rys. 1).

Parametry strukturalne badanych filtrów: d_{Fa} – średnia arytmetyczna średnica włókna, d_{Fg} i σ_{gdF} – średnia geometryczna średnica włókna i geometryczne odchylenie standardowe, d_{AP} – średnia średnica włókna wyznaczona ze spadków ciśnienia, d_{Frms} – średnia średnica kwadratowa, α – gęstość upakowania filtra, L – grubość filtra zebrane są w tabelcy 1.

Na podstawie zdjęć próbek filtrów zmierzono średnice kilkudziesięciu włókien z każdego filtra i obliczono wartości średniej średnicy arytmetycznej oraz średniej średnicy geometrycznej z rozkładu logarytmiczno-normalnego. Średnia średnica kwadratowa została wyznaczona na podstawie poniższego wzoru:

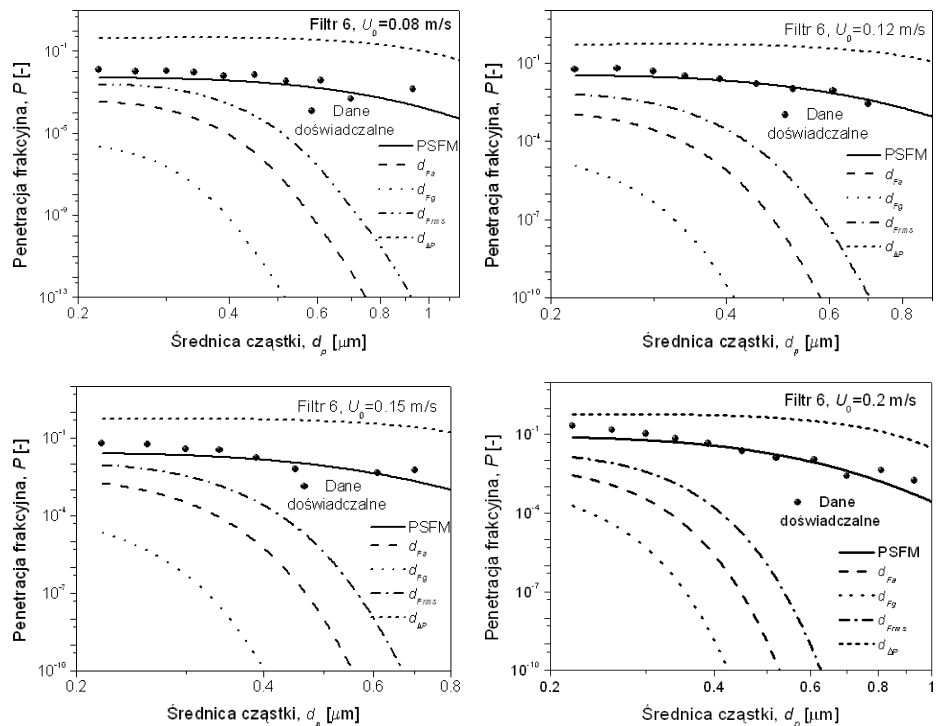
$$d_{Frms} = d_{Fg} \sqrt{\exp(2 \ln^2 \sigma_{gdF})} \quad (1)$$

Natomiast do określenia równoważnej średnicy włókna uzyskanej z pomiaru spadku ciśnienia w filtrze posłużył wzór [1]:

$$\Delta p = \frac{4\alpha L \mu_g U_0 (1 + 1,996 Kn_F)}{R_F^2 [Ku + 1,996 Kn_F (-0,5 \ln \alpha - 0,25 + 0,25 \alpha^2)]} \quad (2)$$

gdzie:

- Kn_F – jest to liczba Knudsen, $Kn_F = \lambda_g / R_F$
- λ_g – średnia droga swobodna cząsteczek gazu,
- R_F – promień włókna,



Rys. 3. Porównanie penetracji wyznaczonych doświadczalnie z obliczonymi dla filtra #6 dla czterech różnych prędkości przepływu powietrza

Ku – liczba Kuwabary, $Ku = -\ln \alpha / 2 - 3/4 + \alpha - \alpha^2 / 4$
 μ_g – lepkość gazu.

Początkową penetrację, P , polidispersyjnych cząstek aerozolowych przez osiem polipropylenowych filtrów włókninowych wyznaczoną eksperymentalnie, porównano z wynikami obliczeń teoretycznych, wykorzystując klasyczną teorię filtracji dla filtrów monodispersyjnych w oparciu o średnią arytmetyczną, geometryczną, kwadratową średnicę włókna, śred-

nicę włókna wyznaczoną ze spadków ciśnienia oraz model przepływu częściowo segregowanego, *PSFM*, [2] dla filtrów o strukturze polidispersyjnej.

W przypadku wszystkich badanych filtrów oraz wszystkich prędkości przepływu aerozolu penetracja liczona według klasycznej teorii filtracji wykorzystując równoważną średnicę włókna wyznaczoną ze spadków ciśnienia jest drastycznie przeszacowana. Zaobserwowano, iż penetracja wyznaczona na podstawie średniej arytmetycznej, geometrycznej oraz kwadratowej średnicy włókna może być zarówno wyższa jak i niższa od penetracji wyznaczonej eksperymentalnie. Model *PSFM*, uwzględniający cały rozkład średnic włókien, jest w stanie dokładnie opisać dane eksperymentalne penetracji dla dowolnego filtra polidispersyjnego, (Rys. 2 i 3).

Uzyskane wyniki sugerują, że chcąc poprawnie przewidzieć skuteczność filtracji należy wziąć pod uwagę wpływ niehomogeniczności związanej z różną średnicą włókien tworzących filtr. Wyraźnie pokazują one, iż klasyczna teoria pojedynczego włókna, opierająca się na założeniu homogeniczności struktury filtra i monodispersyjnym rozkładzie włókien, nie

jest w stanie prawidłowo przewidzieć sprawności filtracji dla rzeczywistych filtrów włókninowych, które cechuje polidispersyjny rozkład wielkości włókien. Dla takich polidispersyjnych filtrów klasyczna teoria adaptowana jest zazwyczaj w ten sposób, iż obliczenia teoretyczne skuteczności filtracji prowadzone są przy wykorzystaniu pewnej zastępczej średnicy włókna. Podejście takie, koncepcyjnie najprostsze, nie ma jednak teoretycznego uzasadnienia i jest źródłem poważnych błędów w projektowaniu filtrów włókninowych.

LITERATURA

1. *J. Pich*: Theory of aerosol filtration by fibrous and membrane filter. *Aerosol Science* (ed. C.N. Davies, Academic Press, London, 1966).
2. *A. Podgórski, A. Jackiewicz*: Filtration of aerosol particles in polydisperse fibrous filters. I – Models formulation. *European Aerosol Conf.* 2008, Thessaloniki. Abstract T03A064O.

Udział A. Jackiewicz jest współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”.