

Anna JACKIEWICZ¹, Leon GRADON¹, Jakub MICHALSKI², Damian WITKOWSKI¹

e-mail: a.jackiewicz@ichip.pw.edu.pl

¹ Katedra Inżynierii Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa² Zakład Projektowania Materiałów, Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Filtracja nieustalona w wielowarstwowych strukturach włókninowych

Wstęp

Zagadnienia separacji skondensowanych form materii tj. cząstek fazy stałej lub kropli cieczy z fazy ciągłej – gazu lub cieczy – są bardzo ważnym obszarem badawczym głównie z powodów ochrony środowiska i zdrowia człowieka oraz technologicznych. Bardzo dobrym narzędziem służącym do tego celu są włókninowe materiały filtracyjne, których zakres zastosowań choć szeroki jest stale poszerzany. Nowe rozwiązania technologiczne, zastępujące stare, wymagające dużych nakładów aparaturowych, materiałowych i energetycznych ukierunkowują badania nad filtracją na zagadnienia dotyczące opracowania nowoczesnych struktur filtracyjnych zapewniających dłuższy czas życia filtra, większą pyłochłonność.

W literaturze przedmiotu dominują badania dotyczące stanu początkowego filtracji, natomiast niewiele jest dostępnych danych doświadczalnych opisujących stan nieustalony. Ograniczenie analizy tylko do stanu początkowego filtracji nie pozwala jednak w pełni na optymalizację struktury filtrów, na określenie optymalnego czasu ich użytkowania.

Celem pracy było zaprojektowanie złożonych wkładów filtracyjnych, poprawiających ekonomikę procesów separacji aerozoli – zapewniających dłuższy *czas życia*, równomierne wypełnienie przestrzeni filtra depozytami oraz zaprezentowanie nowoczesnego podejścia do rozwiązywania problemów filtracji nieustalonej w takich strukturach.

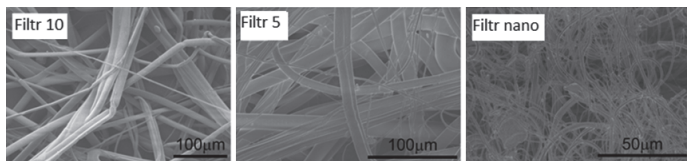
Badanie filtracji nieustalonej

Metodyka badawcza

W pracy zaproponowano koncepcję niejednorodnych przestrzennie struktur włókninowych założonych z trzech różnych filtrów ułożonych w różnych konfiguracjach, których charakterystykę strukturalną zamieszczono w tab. 1. Filtr 10 miał najgrubsze włókna i porowatość porównywalną do Filtra 5, który to miał nieco cieńsze włókna, natomiast najmniej upakowanymi włóknami o najmniejszych średnicach rzędu nanometrów charakteryzował się Filtr nano (Rys. 1). Takie cienkie włókna są bardzo dobrymi atraktorami cząstek, dlatego też zapewniają ich wychwytywanie z gazu z bardzo dużą skutecznością [Jackiewicz i in., 2013; Leung i Hung, 2010; Podgórski i in., 2006].

Tab. 1. Parametry strukturalne badanych filtrów

Nazwa filtra	Średnia średnica włókna [μm]	Grubość [mm]	Porowatość [%]	Masa powierzchniowa [g/m ²]
Filtr 10	8,99 ± 0,76	4,19	92,5	193,5
Filtr 5	5,60 ± 0,99	2,72	92,8	101,5
Filtr nano	0,47 ± 0,83	1,75	98,1	30,5



Rys. 1. Zdjęcia SEM badanych filtrów

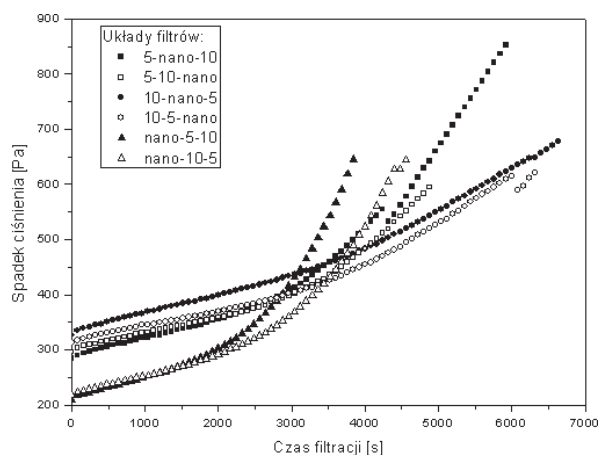
Badane filtry wykonane zostały z polipropylenu techniką *melt-blown*, polegającą na rozdmuchu stopionego polimeru w strumieniu gorącego powietrza. Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej dysponuje nowoczesną technologią do produkcji takich materiałów włókninowych, dzięki której dostosowując parametry procesowe można wytworzyć każdą włóknistą strukturę określoną przez

jej średnicę włókien, gęstość ich upakowania, które to z kolei decydują o własnościach filtra.

Przy użyciu najwyższej klasy aparatury do testowania włókien filtracyjnych firmy *Palas* możliwe było analizowanie stanu nieustalonego filtracji, czyli badanie jak zmieniają się podstawowe parametry, które należy wziąć jednocześnie pod uwagę projektując materiały filtracyjne tj. sprawność filtracji i spadek ciśnienia w rzeczywistych warunkach pracy, podczas ciągłego obładowywania ich cząstkami aerozolowymi. Do badań użyto znormalizowanego pyłu polidispersyjnego o nazwie handlowej *Arizona Fine Test Dust*, którego głównym składnikiem jest krzemionka. Wszystkie układy filtracyjne zostały przebadane w tych samych warunkach, przy prędkości przepływu aerozolu 0,2 m/s. Pomiarzy były prowadzone do osiągnięcia na filtrze dwu- lub trzykrotności początkowego spadku ciśnienia.

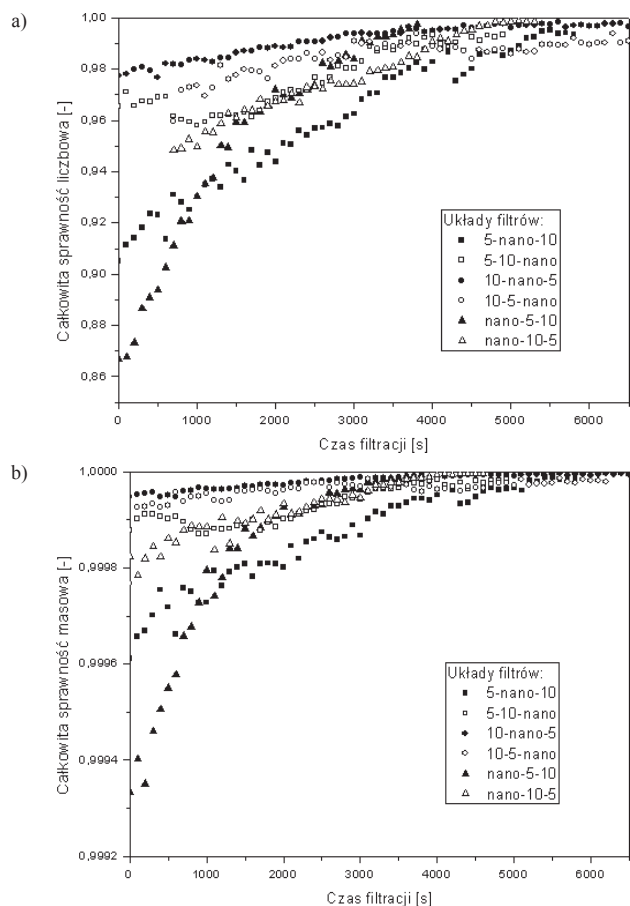
Analiza zmian parametrów pracy wielowarstwowych układów filtracyjnych w czasie

Nazwy badanych układów filtracyjnych rozpoczynają się od nazwy włókniny znajdującej się jako pierwsza od wlotu aerozolu (na froncie). Na rys. 2 przedstawiono zmiany spadków ciśnienia, odnotowane na różnych układach filtrów, wraz z czasem trwania procesu filtracji. Układy posiadające Filtr nano na froncie charakteryzują się najniższym początkowym spadkiem ciśnienia, jednak jego wzrost jest szybszy w porównaniu z innymi układami. Pod tym względem korzystniejsza struktura to ta z filtrem o grubszych włóknach na froncie, tj. Filtr 10 lub 5, dla której wzrost oporu stawianego przez układ w czasie ma zdecydowanie łagodniejszy przebieg. Można to tłumaczyć wychwytem cząstek w całej objętości Filtra 10. Nie tworzy się wówczas warstwa osadu *na czole*, tzw. placki, która powodowałaby szybki wzrost spadku ciśnienia, jak to miało miejsce w przypadku układów z Filtr 10 jako pierwszym.



Rys. 2. Zależność spadków ciśnienia na wielowarstwowych strukturach filtracyjnych od czasu trwania procesu filtracji

Na rys. 3a i 3b widać, że wszystkie badane układy wielowarstwowe odznaczają się bardzo wysoką sprawnością odpylania. Jednak to właśnie warstwy z filtrem 10 na froncie, a dokładniej układ 10-nano-5, charakteryzuje się najwyższą sprawnością już od początku trwania procesu filtracji. Należy stąd wnioskować, że optymalne warunki pracy układy takie osiągają, gdy na froncie znajduje się filtr o stosunkowo grubych włóknach wychytujących największe cząstki z zapyłonego gazu. Za nim znajduje się filtr wysokosprawny, a więc o małych średnicach włókien. Jako trzecia umieszczona jest warstwa, której należy przypisać rolę podopory dla filtrów znajdujących się ponad nią.



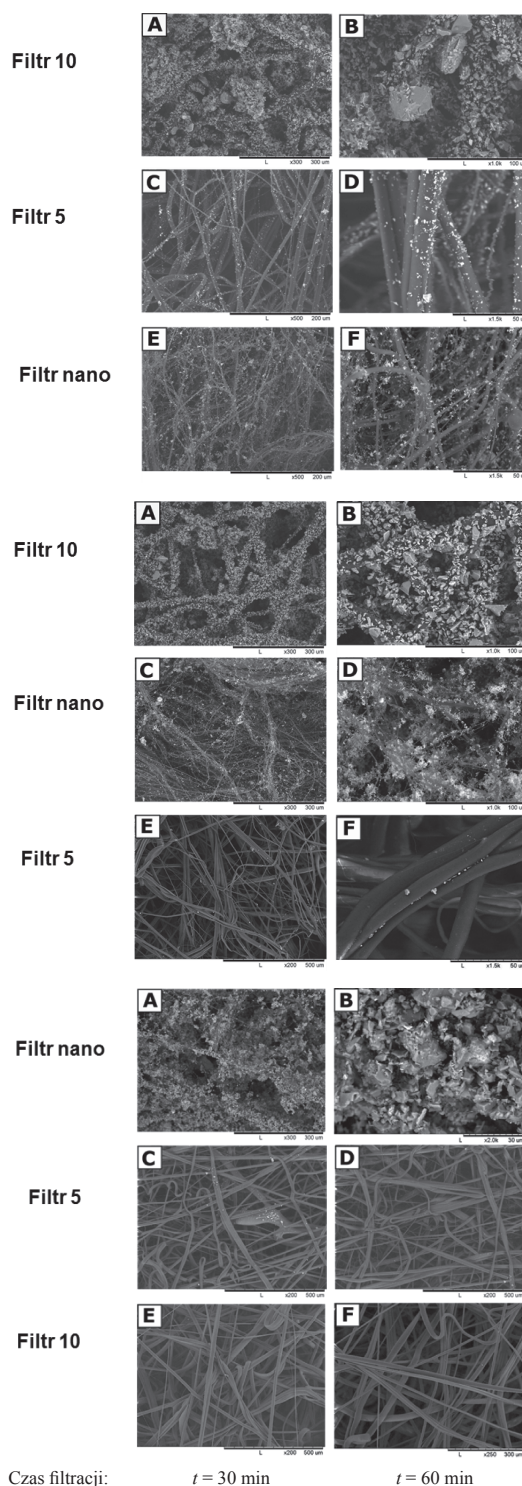
Rys. 3. Zmiana całkowitej sprawności liczbowej (a) oraz masowej (b) wielowarstwowych układów filtracyjnych w czasie filtracji cząstek stałych

Analiza obciążonych pyłem struktur filtracyjnych

Do obserwacji obciążonych pyłem struktur wykorzystano nowoczesne techniki, tj. wysokiej rozdzielczości skaningową mikroskopię elektronową. Na rys. 4 zaprezentowano zdjęcia trzech układów filtracyjnych – 10-5-nano, 10-nano-5, nano-5-10 – po 30 i 60 minutach filtrowania aerozolu. Widać, że z czasem trwania procesu separacji cząstek z gazu filtr się zabudowuje, zmienia się jego wewnętrzna struktura, a charakter tych zmian jest silnie uzależniony od morfologii filtra. Filtr 10 wyłapuje duże cząstki w całej objętości, dlatego też na występujący po nim Filtrze nano nie tworzy się tak szybko placek. Wszystkie drobne cząstki są wyłapywane przez Filtr nano, natomiast Filtr 5 znajdujący się na spodzie pełni rolę stelaża podtrzymującego układ. Należy też pamiętać, że musi on być dość sprawny by wychwycić cząstki, które ewentualnie po uprzednim zdeponowaniu na włóknach ulegną przemieszczeniu w filtrze lub całkowitemu oderwaniu i wyjściu poza filtr.

Wnioski

Wnikliwa analiza zmian morfologii różnych układów filtracyjnych i zdeponowanych na nich cząstek na różnych etapach procesu filtracji posłużyła do wybrania optymalnej struktury, zapewniającej większą pyłochłonność, równomierne zabudowywanie filtra depozytami, a tym samym wydłużenie czasu jego pracy. Projektując układy wielowarstwowe z filtrów o odmiennej strukturze wewnętrznej można połączyć ich zalety – optymalnym okazało się połączenie Filtra 10 (o dużych średnicach włókien), umieszczonego na froncie, z wysokosprawnym Filtrmem nano w środku i zastosowanie Filtra 5 jako stelaża dla powyższych włókien. W konsekwencji otrzymane wyniki pozwolą na skonstruowanie filtra gradientowego do określonego celu, w którym nie będą występowały ostre granice w warstwach, lecz będzie on posiadał strefy, w których parametry takie jak średnica włókien oraz porowatość będą się zmieniać w sposób płynny.



Rys. 4. Zdjęcia SEM układów filtracyjnych obciążonych w różnym czasie pyłem

LITERATURA

Jackiewicz A., Podgórski A., Gradoń L., Michalski J., 2013. Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. *KONA Powder and Particle Journal*, **30**, 244-255

Leung W., Hung C., Yuen P., 2010. Effect of the face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Separation and Purification Technology*, **71**, 30-37. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.10.017

Podgórski A., Bałazy A., Gradoń L., 2006. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 6804-6815. DOI: 10.1016/j.ces.2006.07.022

Praca została częściowo sfinansowana z projektu LIDER III Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.