

Ewa SZTUK, Łukasz ŻYWCZYK, Arkadiusz MOSKAL, Leon GRADÓŃ

e-mail: e.sztuk@ichip.pw.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Model numeryczny wgłębnej filtracji wody

Wstęp

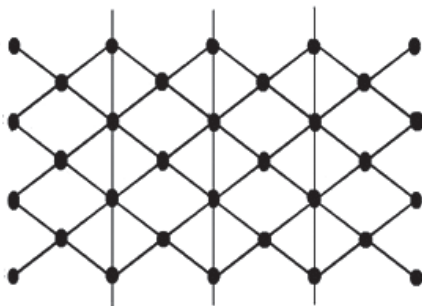
Dobrze zaprojektowane filtry włókninowe powinny charakteryzować się efektywnym usuwaniem cząstek o danym rozmiarze z odpowiednio wysoką sprawnością oraz powodować możliwie niskie opory przepływu płynu. Obecne na rynku produkty nie spełniają w pełni założeń filtracji wgłębnej. Większość z nich pracuje krótko a cząstki niewiele penetrują w głąb objętości materiału filtracyjnego.

W celu zwiększenia efektywności wyłapywania cząstek polidispersyjnych przy jednocześnie długim okresie użytkowania wkładu projektuje się filtr jako strukturę wielowarstwową. Poszczególne warstwy charakteryzują się różną porowatością. Celem pracy było zoptymalizowanie pracy filtra poprzez odpowiednie ustawienie warstw w strukturze porowatej.

Metoda obliczeniowa

Schemat obliczeń

W celu zoptymalizowania pracy filtra, wykorzystano popularny 2-wymiarowy *network model* [Payatakes i in., 1973]. Skomplikowana porowata struktura materiału filtracyjnego została przybliżona systemem cylindrycznych kanałów wzajemnie ze sobą połączonych, pod kątem 45°, w punktach węzłowych (Rys. 1).



Rys. 1. Przybliżenie struktury porowatej filtra układem połączonych kanałów (rurek)

Założenia

Założono, że w węzłach zachodzi idealne mieszanie. Zmieniając średnicę i gęstość upakowania owych przewodów osiągnięto różne porowatości pojedynczej warstwy filtracyjnej.

Założono, że przepływ przez przewody jest laminarny. Korzystając z równania *Hagen-Poiseuille'a* obliczono rozkład strumieni Q i spadek ciśnienia ΔP w poszczególnych rurkach [Ochi i Vernoux, 1999].

Sprawność depozycji cząstek

Sprawność depozycji cząstek w pojedynczym kanale η przybliżono zależnością empiryczną, dla cząstek o średnicy mniejszej niż średnica przewodu, w którym cząstka obecnie się znajduje [Rege i Fogler, 1988]:

$$\eta = 4 \left[\left(\frac{\theta a}{R_0} \right)^2 - \left(\frac{\theta a}{R_0} \right)^3 \right] + \left(\frac{\theta a}{R_0} \right)^4 \quad (1)$$

Korelacja ta uwzględnia wartość przepływu płynu v , promień cząstki r_p oraz parametry geometryczne danego przewodu, pierwotny promień r_0 . Parametr θ określony jest zależnością:

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{v}{v^*}\right) \quad (2)$$

gdzie:

θ_0 – stała zależna od siły jonowej roztworu i pH ,

v – prędkość płynu w rurce,

v^* – prędkość krytyczna [Gruesbeck i Collins, 1982].

Po przepuszczeniu danej liczby cząstek N przez strukturę przeliczono na nowo promienie porów r_{new} uwzględniając stosunek liczby zdeponowanych w danym kanale cząstek do średnicy tego kanału, stosując zależność [Chang i in., 2004]:

$$\frac{1}{r_{new}^4} = \frac{1}{r_0^4} + \frac{0,75}{r_0^4} \sum_{i=1}^N \frac{r_{pi}}{L} \left[1 - \left(1 - \frac{r_{pi}}{r_0} \right)^2 \right]^2 K_1 \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{1 - \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{r_{pi}}{r_0} \right)^2 - 0,202 \left(\frac{r_{pi}}{r_0} \right)^5}{1 - 2,1 \frac{r_{pi}}{r_0} + 2,09 \left(\frac{r_{pi}}{r_0} \right)^3 - 1,71 \left(\frac{r_{pi}}{r_0} \right)^5 + 0,73 \left(\frac{r_{pi}}{r_0} \right)^6} \quad (4)$$

Obliczenia wartości rozkładu strumieni, spadku ciśnienia i sprawności powtarzano dla nowych wartości promieni przewodów do chwili osiągnięcia całkowitego zapchania się struktury filtra.

Charakterystyka materiału filtracyjnego

Symulacje komputerowe przeprowadzono dla materiału filtracyjnego składającego się z trzech różnych warstw o parametrach:

1. Porowatość $\varepsilon = 0,97$, średnica porów $d_0 = 28 \mu\text{m}$, odchylenie standardowe $\sigma = 4 \mu\text{m}$, długość pora $L = 29,5 \mu\text{m}$
2. Porowatość $\varepsilon = 0,95$, średnica porów $d_0 = 11 \mu\text{m}$, odchylenie standardowe $\sigma = 2 \mu\text{m}$, długość pora $L = 12 \mu\text{m}$
3. Porowatość $\varepsilon = 0,90$, średnica porów $d_0 = 5 \mu\text{m}$, odchylenie standardowe $\sigma = 0,5 \mu\text{m}$, długość pora $L = 10 \mu\text{m}$

Poszczególne warstwy złączono w trzech różnych konfiguracjach. Zbadano również przypadek włókniny jednorodnej (monowarstwy), o parametrach uśredniających ww. wartości:

Porowatość $\varepsilon = 0,84$, średnica porów $d_0 = 5 \mu\text{m}$, odchylenie standardowe $\sigma = 0,5 \mu\text{m}$, długość pora $L = 9 \mu\text{m}$

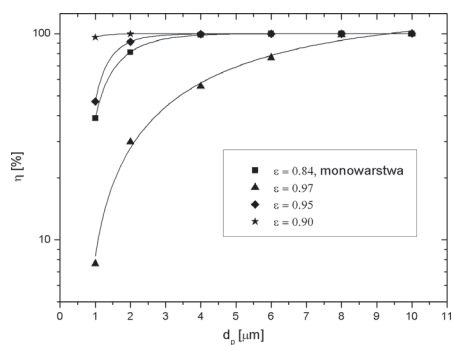
Grubość włókniny filtracyjnej w obu przypadkach była taka sama. Zanieczyszczenie stanowiły cząstki o rozmiarach $1 \div 10 \mu\text{m}$.

Wyniki obliczeń

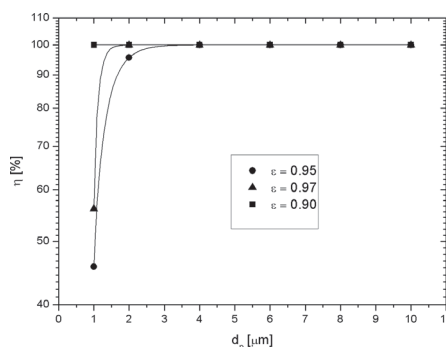
Wyniki obliczeń sprawności depozycji zamieszczono na rys. 2 i 3. Przyrost spadku ciśnienia w bezwymiarowym czasie obładowywania włókniny dla warstwy jednorodnej oraz różnych konfiguracji warstw przedstawiono na rys. 4. Struktury filtra o różnej konfiguracji warstw pokazano na rys. 5–7.

Obserwując na rys. 2 wyniki sprawności depozycji można zauważyć, że włóknina złożona z kilku warstw o różnych rozmiarach średnic porów efektywniej wyłapuje cząstki niż monowarstwa o mniejszej porowatości. Różnica w efektywności jest tym większa im mniejszy jest rozmiar wyłapywanej cząstki.

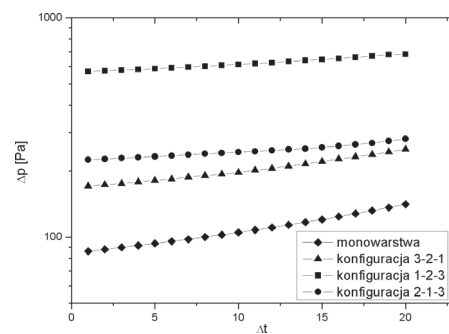
Włóknina wielowarstwową, składająca się z warstw o odpowiednio dobranej porowatości, wychwytuje cząstki stałe w całej swej objętości i w ten sposób zdeponowana masa rozkłada się równomiernie w całym filtrze (Rys. 5).



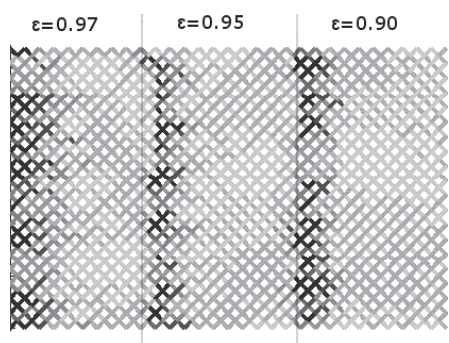
Rys. 2. Sprawność filtracji cząstek w zależności od ich średnicy dla warstwy jednorodnej oraz konfiguracji warstw (1-2-3)



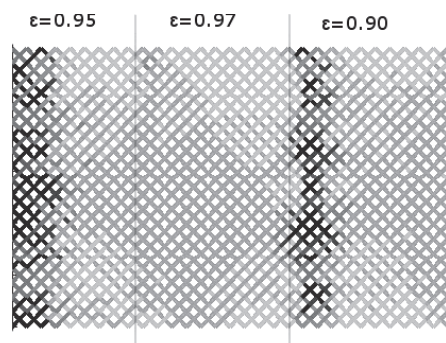
Rys. 3. Sprawność filtracji cząstek w zależności od ich średnicy dla konfiguracji warstw (2-1-3)



Rys. 4. Przyrost spadku ciśnienia w bezwymiarowym czasie obładowywania włókniny dla warstwy jednorodnej oraz różnych konfiguracji warstw



Rys. 5. Struktura filtra o konfiguracji warstw (1-2-3) po zakończeniu symulacji. Pory zablokowane (kolor ciemniejszy). Struktura obładowywana równomiernie



Rys. 6. Struktura filtra o konfiguracji warstw (2-1-3) po zakończeniu symulacji. Pory zablokowane (kolor ciemniejszy). Struktura częściowo obładowywana



Rys. 7. Struktura filtra o konfiguracji warstw (3-2-1) po zakończeniu symulacji. Pory zablokowane (kolor ciemniejszy). Jedynie pierwsza warstwa struktury filtra zablokowana

Obserwuje się ponadto, że efektywności depozycji otrzymane dla kombinacji warstw 1-2-3 oraz 2-1-3 nie różnią się zbytnio (Rys. 3). Ważne jest natomiast uwzględnienie faktu, w jaki sposób struktura filtra jest wykorzystana w czasie przebiegu procesu filtracji. Widać, że w przypadku używania konfiguracji 2-1-3, środkowa warstwa jest wykorzystana w najmniejszym stopniu (Rys. 6).

Wnioski

Z symulacji wynika, że do filtracji cząstek o szerokim rozkładzie rozmiarów średnic najbardziej wydajne są struktury wielowarstwowe. Zwiększona jest bowiem żywotność filtra, a zanieczyszczenia zatrzymywane są w objętości materiału filtracyjnego. Cząstki o dużych rozmiarach zatrzymywane są w czołowych częściach włókniny, nie powodując blokowania przepływu cząstkom mniejszym, skutecznie wychwytywanym w dalszych partiach.

Silny wpływ na sprawność filtracji oraz żywotność filtra w przypadku struktur niejednorodnych ma odpowiednia kolejność ułożenia warstw o różnej porowatości. Wkład zbudowany z warstw o rosnących porowatościach zapycha się już na samym początku procesu, powodując całkowite zatrzymanie przepływu (Rys. 7).

Konstruując filtr z warstw o porowatościach malejących wraz z kierunkiem przepływu medium, osiąga się najbardziej równomierne rozłożenie cząstek w objętości filtra (Rys. 5). Struktura ta wykazuje największy spadek ciśnienia ze wszystkich układów wielowarstwowych (jak wynika z rys. 4), ale jej blokowanie następuje po czasie zdecydo-

wanie dłuższym niż w pozostałych przypadkach. Wysokie sprawności przy pozostałych konfiguracjach osiągnąć się przy krótkiej żywotności materiału.

Przez zastosowanie filtrów wielowarstwowych, zbudowanych z włókien o odpowiednio dobranych malejących porowatościach, można znacznie wydłużyć czas pracy filtra, osiągając wysokie sprawności filtracji cząstek o niejednorodnym rozkładzie wielkości średnic.

LITERATURA

- Chang Y.I., Chen S.C., Chan H.C., Lee E., 2004. Network simulation for deep bed filtration of Brownian particles. *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 4467-4479. DOI: 10.1016/j.ces.2004.07.023
- Gruesbeck C., Collins R.E., 1982. Entrainment and deposition of fine particles in porous media. *SPE J.*, **22**, nr 6, 847-856. DOI: 10.2118/8430-PA
- Ochi J., Vernoux J.F., 1999. A two-dimensional network model to simulate permeability decrease under hydrodynamic effect of particle release and capture. *Transport in Porous Media*, **37**, 303-325. DOI: 10.1023/A:1006690700000
- Payatakes A.C., Tien C., Turian R.M., 1973. A New model for granular porous media. Part I. Model formulation. *AIChE J.*, **19**, nr 1, 58-67. DOI: 10.1002/aic.690190110
- Rege S.D., Fogler H.S., 1988. A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsions drops. *AIChE J.*, **34**, nr 11, 1761-1772. DOI: 10.1002/aic.690341102

Badania były finansowane przez Polish-Swiss Research Programme „Nowe nanokompozytowe materiały filtracyjne do adsorpcyjnego oczyszczania wody” NANOSORP PSPB-209/201.