Prosimy cytować jako: Inż. Ap. Chem. 2016, 55, 2, 80-81

Maciej SZWAST[1], Zbigniew SZWAST[2]

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

[1] Katedra Inżynierii Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa
[2] Zakład Procesów Rozdzielania, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Mikrofiltracja z podawaniem nadawy płynącej wraz z pęcherzykami powietrza

Wstęp

Mikrofiltracja jest membranowym procesem rozdzielania zawiesin rozdrobnionego ciała stałego w cieczy. Siłą napędową jest różnica ciśnień po obu stronach membrany. Produktami tego procesu są: ciecz klarowna i zawiesina zagęszczona. Instalacje mogą różnić się między sobą zależnie od tego, który produkt jest pożądany, ale wspólną cechą wszystkich procesów mikrofiltracji jest pojawianie się na powierzchni membrany osadu o rosnącej lub ustabilizowanej w czasie grubości.

Osad jest źródłem dodatkowego oporu, w stosunku do oporu samej membrany, stawianego klarownej cieczy przemieszczającej się na drugą stronę membrany. Dodatkowy opór powoduje zmniejszanie się strumienia permeatu oraz zmniejszanie się szybkości powstawania produktu pożądanego [*Szwast i in., 2013*]. Projektant procesu powinien zatem zmierzać do ograniczania grubości powstającego osadu.

Filtracja krzyżowa jest jednym ze sposobów realizacji procesów mikrofiltracji. Nadawa przepływa wtedy równolegle do powierzchni membrany, zaś permeat przepływa przez membranę w kierunku prostopadłym. Napływający strumień nadawy zmywa z membrany część placka filtracyjnego zmniejszając dodatkowy opór filtracji. Aby znacznie zmniejszyć opór, strumień nadawy musi być odpowiednio duży. W praktyce stosuje się procesy z recyrkulacją cieczy, w których masa cieczy będąca w obiegu jest odpowiednio duża.

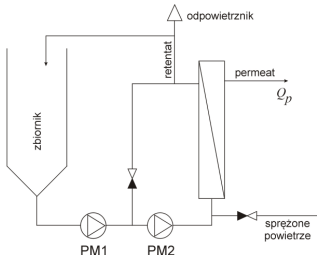
W niniejszej pracy badano procesy mikrofiltracji w układzie filtracji krzyżowej. Skupiono się na procesach, w których produktem pożądanym była zawiesina zagęszczona. Przedstawione badania stanowią kontynuację wcześniejszych badań autorów nad filtracją krzyżową. Tematyka bieżącej pracy wynikła ze stwierdzenia, że duża masa cieczy będąca w obiegu wymaga dużego wkładu energii, a zatem wysokiego nakładu finansowego. Doprowadziło to do poszukiwania odpowiedzi na pytanie: Jak zmieni się efektywność procesu, a więc i jego koszt, jeżeli do modułu membranowego zamiast nadawy dwufazowej: ciecz-ciało będzie doprowadzana nadawa trójfazowa: ciecz-ciało stałe-gaz? Niniejsza praca powinna wskazać na celowość dalszych badań nad instalacjami z nadawą płynącą wraz z pęcherzami powietrza lub na porzucenie takich badań. Każdy wniosek potwierdzony wynikami badań, będzie cenny dla projektanta instalacji membranowych.

Badania doświadczalne

Trzeba wyraźnie podkreślić, że praca miała charakter wczesnego rozpoznania postawionego tu zagadnienia podawania nadawy wraz z pęcherzykami powietrza do układu mikrofiltracji krzyżowej. W literaturze brak jest informacji o takich badaniach. Autorzy niniejszej pracy, będąc również współautorami pracy [*Luśnia i in., 2010*], badali wpływ pęcherzyków omywających filtr zanurzeniowy na strumień permeatu. Wpływ ten był zależny od położenia (pionowego lub poziomego) powierzchni membrany i był złożeniem pozytywnego oddziaływania przejawiającego się w zmywaniu osadu i negatywnego, w blokowaniu przez pęcherze dostępu cieczy do części powierzchni membrany.

Stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono doświadczenia, przedstawiono schematycznie na rys. 1.

Jest to zmodyfikowane stanowisko, które wcześniej, przed modyfikacją, służyło do uzyskania wyników przedstawionych w pracy [*Szwast i in., 2014*]. Zawiesina ze zbiornika była pompowana za pomocą pompy podającej PM1 o mocy 0,37 kW do węzła, w którym mieszała się ze strumieniem retentatu zawracanym do modułu membranowego. Zmieszane strumienie były pompowane za pomocą pompy obiegowej PM2 o mocy 0,75 kW do modułu membranowego. Wpływający do modułu strumień nadawy i wypływający z niego strumień retentatu płynęły w pionowo w górę. Moduł opuszczał strumień permeatu i strumień retentatu, który następnie dzielił się na strumienie retentatu zawracanego do modułu i zawracanego do zbiornika.



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze było wyposażone ponadto w urządzenie umożliwiające okresowe strącanie z powierzchni membrany całości lub tylko części nagromadzonego osadu z wykorzystaniem strumienia wstecznego permeatu (*back pulse*) oraz w wymiennik ciepła umożliwiający sterowanie temperaturą. Na rys.1 nie zamieszczono tych urządzeń w celu zachowania przejrzystości.

Zawory zaznaczone na rys. 1 są zaworami zwrotnymi jednokierunkowymi, zapewniającymi zwrot strumieni jedynie zgodny ze zwrotem strzałek niezaczernionych.

Modyfikacja stanowiska badawczego wykonana dla potrzeb niniejszych badań polegała na umieszczeniu w dolnej części modułu bełkotki doprowadzającej do nadawy pęcherzyki powietrza oraz odpowietrzacza w górnej części modułu, po stronie retentatu.

Zakres pomiarów. Wykonano pięć serii pomiarowych, a każda była prowadzona w jakościowo innych warunkach zrywania osadu. Różna intensywność zrywania wynikała z uruchamiania (lub nie) pompy PM2, podawania (lub nie) pęcherzyków powietrza, uruchamiania (lub nie) strumienia wstecznego permeatu BP (*Back Pulse*). Charakterystyka serii pomiarowych była następująca:

seria 1 – pracująca pompa PM1 oraz przepływające pęcherzyki;
seria 2 – pracujące pompy PM1 i PM2;
seria 3 – pracujące pompy PM1 i PM2 oraz przepływające pęcherzyki;
seria 4 – pracujące pompy PM1 i PM2 oraz uruchomiony BP;
seria 5 – pracujące pompy PM1 i PM2 oraz uruchomiony BP oraz przepływające pęcherzyki.

Zależność strumienia permeatu od stężenia zawiesiny

Piątkiewicz [*2012*] po analizie wyników dużej liczby doświadczeń zagęszczania zawiesin cząstek ciała stałego w cieczach, prowadzonych na stanowisku badawczym jak na rys. 1, ale przed modyfikacją związaną z możliwością doprowadzania i odprowadzania pęcherzyków powietrza, zaproponował empiryczną formułę opisującą zależność strumienia objętościowego permeatu od stężenia zawiesiny w zbiorniku. Formułę tę zapisano wykorzystując notację przyjętą w niniejszej pracy jako

$$Q_p(T_s) = Q_{p0}(T_s) - \beta \ln \frac{c}{c_0} \tag{1}$$

gdzie: c – stężenie zawiesiny [kg·m^{-3}], c_0 – początkowe stężenie

Prosimy cytować jako: Inż. Ap. Chem. 2016, 55, 2, 80-81

zawiesiny [kgm^{-3}], c/c_0 – stopień zagęszczenia zawiesiny, $Q_p(T_s)$ – strumień objętości permeatu uzyskiwany na instalacji o powierzchni membrany F przy ciśnieniu transmembranowym Δp w temperaturze standardowej [m^{3}s^{-1}], T_s – temperatura standardowa [K], $Q_{p0}(T_s)$ – strumień objętości permeatu w pierwszej chwili procesu [m^{3}s^{-1}], β – współczynnik, którego wartość odczytuje się z wykresu $Q_p(T_s) = f$ [ln (c/c_0)] przedstawiającego wyniki doświadczeń, wartość charakterystyczną dla układu, obejmującą własności membrany i zawiesiny [m^{3}s^{-1}].

Równ. (1) dobrze opisuje wyniki pomiarów dla procesów zatężania zawiesin ciała stałego w cieczy. Ponadto, dobrze opisuje wyniki pomiarów dla analogicznych procesów zatężania mieszanin wody i oleju [*Szwast i in., 2012*]. Niestety równ. (1) powstało jedynie jako wynik dopasowywania wyselekcjonowanych wzorów do wyników doświadczeń, bez wnikania w podstawy teoretyczne postaci tego równania. Dlatego *Szwast i in.* [*2014*] poszukiwali zależności strumienia permeatu od stężenia zawiesiny, która uwzględniałaby chociaż uproszczony model zachodzących procesów.

Podstawowym równaniem opisującym transport cieczy przez membrany porowate jest znane równanie *Darcy'ego*. Dla świeżej membrany (bez osadu na jej powierzchni) można zapisać

$$Q_{p0}(T_s) = \frac{\Delta p}{R_m(T_s)} \tag{2}$$

zaś dla membrany z osadem

$$Q_p(T_s, c) = \frac{\Delta p}{R_m(T_s) + r(T_s, c)} \tag{3}$$

gdzie: Δp – ciśnienie transmembranowe [Pa], $R_m(T_s)$ – opór świeżej membrany o powierzchni F [Pa·s·m^{-3}], $r(T_s, c)$ – opór osadu w momencie, gdy stężenie zawiesiny jest równe c [Pa·s·m^{-3}].

Podczas jednej z prób opisu zależności oporu osadu od stężenia zawiesiny w pracy [*Szwast i in., 2014*] przyjęto

$$r(T_s, c) = \alpha(T_s) \ln \frac{c}{c_0} \tag{4}$$

gdzie: $\alpha(T_s)$ – współczynnik o wartości charakterystycznej dla układu w temperaturze standardowej [Pa·s·m^{-3}].

Równoczesne przekształcenia równ. (2) - (4) prowadzą do następującej, modułowej postaci zależności

$$\frac{Q_{p0}(T_s)}{Q_p(T_s, c)} = 1 + \alpha(T_s) \frac{Q_{p0}(T_s)}{\Delta p} \ln \frac{c}{c_0} \tag{5}$$

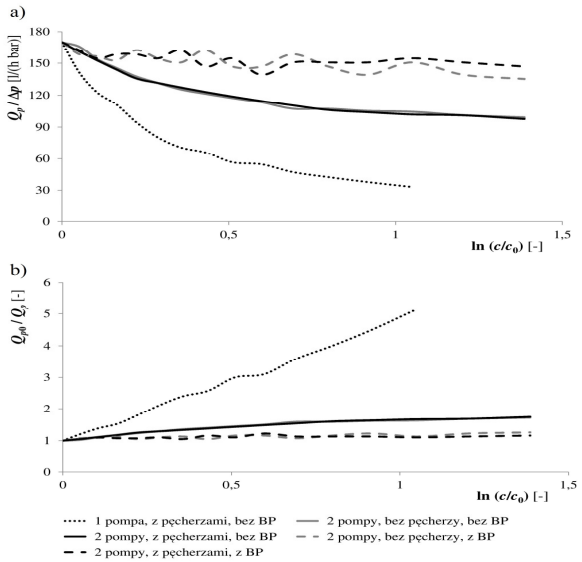
Wyniki doświadczeń uzyskane w pracy [*Szwast i in., 2014*] układają się na wykresie w układzie $Q_{p0}(T_s)/Q_p(T_s, c) = f$ [ln(c/c_0)] na linii prostej, co pozwala wyznaczyć wartość współczynnika $\alpha(T_s)$. Istotne jest to, że te punkty doświadczalne należą do stosunkowo szerokiego zakresu zmienności zatężenia zawiesiny, począwszy od c/c_0=1. Dla większych wartości zagęszczenia, wartość stosunku $Q_{p0}(T_s)/Q_p(T_s, c)$ ustala się.

Uprzedzając analizę wyników doświadczeń uzyskanych w tej pracy można już stwierdzić, że jeden z wniosków dotyczy przydatności modelu opisanego równ. (2) - (5) do opisu mikrofiltracji z nadawą trójfazową. Warto przy tym zauważyć, że wszystkie doświadczenia wykonane w pracy [*Szwast i in., 2014*] były prowadzone w jakościowo takich samych warunkach zrywania osadu z powierzchni membrany. Stąd nie był tam poruszany problem zmienności współczynnika $\alpha(T_s)$ odpowiedzialnego za opis warunków, w jakich znajduje się badany układ. Zostało to omówione podczas analizy wyników badań tej pracy. Kolejne serie odpowiadały rosnącej intensywności zrywania osadu. Należało więc oczekiwać, że będą im towarzyszyć coraz wolniejsze zmiany strumienia permeatu $Q_p(T_s, c)$ związane ze wzrostem stężenia zawiesiny c. Zgodnie z równ. (5), kolejnym seriom powinny odpowiadać coraz mniejsze wartości współczynników $\alpha_i(T_s)$, gdzie i jest numerem serii.

Wyniki i ich analiza

Kolejne serie pomiarowe (zawsze z uruchomioną pompą PM1), jak wykazały wyniki doświadczeń, odpowiadały rosnącej intensywności zrywania osadu. Pomiary każdej serii rozpoczynano po oczyszczeniu powierzchni membrany. Utrzymywano temperaturę 298 K. Dla samodzielnej pracy pompy PM1 ciśnienie transmembranowe wynosiło 1,5 bar, a obu pomp – 3,0 bar. W tej sytuacji należy porównywać wartości wyrażenia $Q_p/\Delta p$, na co wskazuje równ. (3), a nie strumieni Q_p.

Praktyczne nakładanie się na siebie krzywych dla serii 2 i 3 oraz 4 i 5 na rys. 2a, wskazuje, że w badanym układzie krzyżowym doprowadzanie pęcherzyków powietrza nie zmieniało przebiegu procesu. Potwierdza to też rys. 2b przedstawiający zależność zgodną z równ. (5).



Rys. 2: a) Zależność strumienia permeatu znormalizowanego względem ciśnienia od logarytmu naturalnego stopnia zagęszczenia, b) Zależność odwrotności strumienia permeatu znormalizowanego względem wartości początkowej strumienia permeatu dla danej serii pomiarowej od logarytmu naturalnego stopnia zagęszczenia

Wnioski

W badanym układzie krzyżowym, doprowadzanie do nadawy pęcherzyków powietrza nie zmieniło przebiegu procesu. Oznacza to, że pozytywne oddziaływanie pęcherzyków przejawiające się w zmywaniu osadu oraz negatywne – w blokowaniu przez pęcherze dostępu cieczy do części powierzchni membrany, wzajemnie się znoszą.

Zależność strumienia permeatu od stężenia zawiesiny dla nadawy dwufazowej[*Szwast i in., 2014*] może być stosowana dla nadawy trójfazowej.

LITERATURA

Luśnia E., Szwast Z., Szwast M., Piątkiewicz W., (2010). Badanie wpływu warunków procesowych na przebieg mikrofiltracji zanurzeniowej z użyciem włókien polipropylenowych typu hollow fiber. *Inż. Ap. Chem.*, 49(2), 73-74

Piątkiewicz W., (2012). *Wybrane aspekty projektowania membranowych instalacji filtracyjnych o przepływie krzyżowym.* Wyd. Inst. Techn. Ekspl. – PIB, Radom

Szwast M., Nikpour R., Szwast Z., Piątkiewicz W., (2012). Zastosowanie membran ceramicznych do rozdziału mieszanin wody i oleju – badania laboratoryjne i opis matematyczny procesu. *Inż. Ap. Chem.* 51(6), 391-393

Szwast M., Szwast Z., Grądkowski M., Piątkiewicz W., (2013). Modelling of postproduction suspensions' concentration processes by "batch" membrane microfiltration. *Chem. Proc. Eng.,* 34(3), 313-325, DOI: 10.2478/cpe-2013-0025

Szwast M., Nikpour R., Szwast Z., (2014). *Variability of the permeate flow during the concentration of suspensions by microfiltration. Experimental studies* [in:] Bodzek M., Pelczar J. (Eds). Membranes and membrane processes in environmental protection. Env. Eng. Comm., Polish Acad. Sci. (PAN), 119-130 (ISBN: 978-83-63714-18-5)

Praca była finansowana ze środków NCBR na lata 2013-2015 w Programie BlueGas - Polski Gaz Łupkowy. Projekt był realizowany w konsorcjum PolymemTech i Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej.