

## 1. Wprowadzenie

W procesach biotechnologicznych do rozdzielania zawiesin stosuje się najczęściej metody mechaniczne, tj. wirowanie oraz filtrację typu osadowego (*dead-end*) lub membranową filtrację dynamiczną (*cross-flow*). Zawiesiny biologiczne wyróżniają się zazwyczaj bardzo małymi rozmiarami cząstek oraz szerokim przedziałem rozkładu średnic. Są to często zawiesiny o dużej lepkości lub złożonych właściwościach reologicznych, o małej różnicy gęstości pomiędzy fazą stałą a ciekłą, tworzące osady ściśliwe. Zastosowanie tradycyjnych metod rozdzielania, takich jak wirowanie lub filtracja osadowa (nawet z użyciem tzw. pomocy filtracyjnych) jest w wielu przypadkach nieefektywne i nieekonomiczne. Stąd też obserwuje się w biotechnologii rosnące zastosowanie metod dynamicznych w różnych etapach procesów technologicznych (zateżanie biomasy, separacja komórek, izolacja enzymów, itp).

W filtrach dynamicznych zawiesina przepływa z dużą prędkością stycznie do powierzchni filtracyjnej. W wyniku działania naprężeń ścinających na powierzchni membrany tworzy się jedynie cienka warstwa szczątkowego osadu. W ustalonych warunkach procesu grubość warstwy stabilizuje się i zależy od prędkości przepływu zawiesiny nad membraną, konstrukcji aparatu, nadciśnienia w aparacie i właściwości substancji (1,2,3,4,5). Po ustabilizowaniu się grubości warstwy szczątkowej uzyskuje się warunki zapewniające stałą szybkość filtracji, co odróżnia w sposób zasadniczy metodę dynamiczną od metody filtracji osadowej.

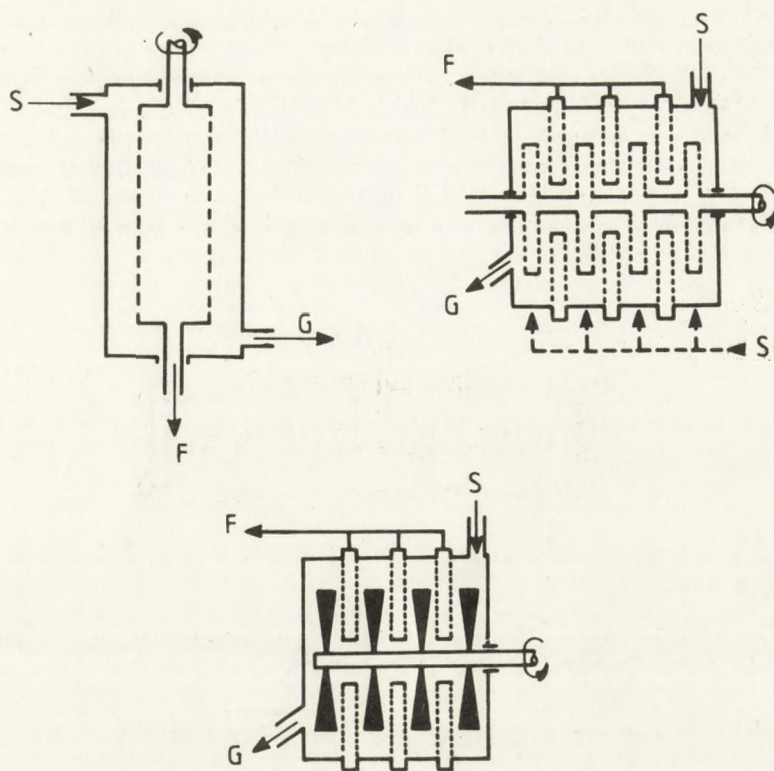
W zależności od sposobu prowadzenia procesu, filtrację dynamiczną można podzielić na dwie kategorie (3): filtrację przeplywową w obszarze niskich wartości naprężeń ścinających (CFF – *low shear cross flow filtration*) i filtrację dynamiczną w obszarze wysokich wartości naprężeń ścinających w aparatach z wirującymi elementami (RDF – *high shear cross-flow, rotary dynamic filtration*).

W filtrach typu CFF zawiesina jest przetlaczana z prędkością od 1 do 5 m/s, w przypadkach szczególnych – z prędkością mniejszą (6) stycznie do powierzchni membrany filtracyjnej płaskiej, cylindrycznej lub o bardziej złożonym kształcie.

W praktyce obserwuje się powolny, postępujący proces blokowania powierzchni filtracyjnej i membrana musi być okresowo regenerowana odwrotnym przepływem filtratu. Ponieważ w filtrach tego typu strumień filtratu jest znacznie mniejszy od strumienia przepływu głównego, w celu uzyskania wymaganego zateżenia musi być zastosowana wielokrotna cyrkulacja zawiesiny, co przy dużym stężeniu końcowym może wywoływać poważne problemy. Wzajemne powiązanie takich parametrów pracy filtru, jak prędkość przepływu zawiesiny i nadciśnienie (wynikające z oporów przepływu) powoduje, że niezależna regulacja tych wielkości jest niemożliwa. Uzyskanie wysokiego ciśnienia wymaga dławienia przepływu, co powoduje spadek prędkości liniowej zawiesiny, a w konsekwencji wzrost oporów filtracji. Niezależnie od tych niedogodności filtracja typu CFF znajduje szerokie zastosowanie w biotechnologii zarówno w obszarze mikro- jak i ultrafiltracji.

W filtrach typu RDF naprężenia ścinające na powierzchni membrany wywoływane są działaniem wirujących elementów, rys. 1.





Rys.1. Zasada działania filtrów dynamicznych RDF; S – surówka, F – filtrat, G – gęstwa.

Stosowane są wirujące cylindryczne powierzchnie filtracyjne (a) wirujące i nieruchome tarcze filtracyjne (b) oraz wirujące mieszadła tarczowe lub turbinowe w sąsiedztwie nieruchomych tarcz filtracyjnych (c). Wielkość naprężeń ścinających na powierzchni membrany filtracyjnej może być w tych aparatach regulowana prędkością obrotową elementów ruchomych, niezależnie od przepływu głównego zawiesiny przez filtr oraz nadciśnienie w aparacie. Ma to bardzo istotne znaczenie, zwłaszcza w przypadkach występowania osadów o znacznej ściśliwości.

W porównaniu z metodą szybkoprzeplywową CFF można wymienić dalsze korzyści stosowania filtracji dynamicznej typu RDF, jak np.

- stosowalność do separacji zawiesin o wyższym stężeniu ciała stałego, wyższej lepkości cieczy, a zwłaszcza nieniu-tonowskich właściwościach fazy płynnej;
- zmniejszenie intensywności cyrkulacji przez aparat;
- wyeliminowanie lub zmniejszenie częstotliwości regeneracji membrany filtracyjnej.

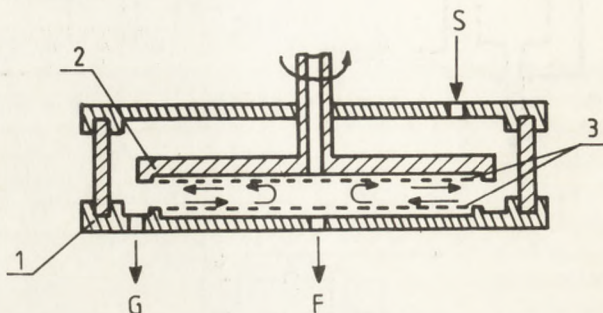
Natomiast zasadniczą wadą filtrów mechanicznych – w porównaniu z przeplywowymi – jest ich złożona konstrukcja. Mimo to, badania nad zastosowaniem filtrów RDF w biotechnologii są znacznie zaawansowane (7,8,9,10,11,12), zwłaszcza dotyczy to filtrów z powierzchnią cylindryczną. Firma „Sulzer” publikuje dane dotyczące jednostki w skali pilotowej o powierzchni filtracyjnej 2 m<sup>2</sup> (7), natomiast „Membrex” oferuje separatory cylindryczne w skali laboratoryjnej (8,9). W badaniach nad filtracją drożdży w filtrach cylindrycznych osiągnęto w skali laboratoryjnej wydajności filtratu rzędu 150–200 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> x h pod ciśnieniem 1 bara przy 2000 obr/min przegrody filtracyjnej.



W skali półtechnicznej (7) przy zastosowaniu cylindra o średnicy 270 mm, pod ciśnieniem 1–1,5 barów i przy 800 obr/min uzyskiwano  $180 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \times \text{h}$ .

Należy zaznaczyć, że filtry „Sulzera” wyposażone są w chłodnicę zewnętrzną (nieruchomą) powierzchni cylindrycznej, co umożliwia termostatowanie rozdzielanej zawiesiny.

Zainteresowanie zastosowaniem filtrów dynamicznych tarczowych wynika z łatwości ich rozbudowy w celu uzyskania niezbędnej powierzchni filtracyjnej. Wyniki badań separacji zawiesin biologicznych w filtrach tego typu wskazują na możliwości uzyskania podobnych wydajności filtracji jak w urządzeniach cylindrycznych (10,15). Schemat typowej komory badawczego filtra tarczowego podany jest na rys. 2.



Rys.2. Schemat komory filtra dynamicznego; 1 – nieruchoma tarcza filtracyjna, 2 – wirująca tarcza filtracyjna, 3 – membrana, S – surowka, F – filtrat, G – gęstwa.

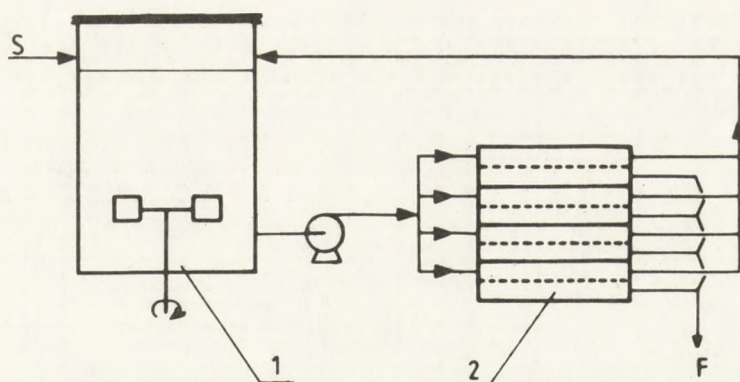
W przypadku filtracji drożdży w aparatach o średnicy tarczy 250 mm pod ciśnieniem 1 bara uzyskano przy 800 obr/min wydajność rzędu  $150 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \times \text{h}$ . Podczas filtracji zawiesin zawierających mikroorganizmy *Bacillus subtilis* pod ciśnieniem 2,5 bara uzyskiwano wydajności znacznie niższe –  $30 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \times \text{h}$ , co wynika z dużej ścisłości osadu w tym przypadku. Nie stwierdzono, mimo nasuwających się wstępnie wątpliwości, ujemnego działania wirujących elementów na właściwości filtrowanych zawiesin biologicznych (7,10), nawet w takim przypadku jak detoksykacja krwi (12).

Dotychczasowe prace nad zastosowaniem filtrów dynamicznych tarczowych pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków (13,14):

- w zakresie dużych stężeń ciała stałego w zawieszynie zastosowanie mieszadeł jest uzasadnione z uwagi na dyfuzyjny opór migracji wody w stężonej zawieszynie (filtry typu c);
- w zakresie niskich stężeń zawieszyny wyższe szybkości filtracji uzyskuje się z powierzchni wirujących (filtry typu a i b). Jest to istotne w przypadku wielu zawiesin biologicznych, rozdzielanych w obszarze mikrofiltracji i wskazuje na konieczność rozwinięcia badań nad tymi filtrami w zastosowaniach biotechnologicznych. Można tu podkreślić, że dotychczas jedynie filtry z mieszadłami (typ c) o zastosowaniu ogólnym zostały wprowadzone szerzej na skalę przemysłową.

Rozważany jest na przykład problem wykorzystania filtra RDF jako modułu mikrofiltracyjnego bioreaktora membranowego. Bioreaktor z zewnętrznymi modułami typu RDF pozwalałby na wykorzystanie wszystkich zalet filtrów dynamicznych do prowadzenia długotrwałych procesów fermentacyjnych z ciągłym odbiorem produktów. W przypadku aparatów tarczowych powierzchnię filtracyjną można w nich łatwo powiększyć. Nowe moduły można łączyć z istniejącymi bioreaktorami, a cały układ może być skonstruowany przy użyciu istniejącego standardowego wyposażenia. Aby uniknąć niebezpieczeństwa związanego ze zbyt długim czasem przebywania zawiesziny poza reaktorem lub podwyższenia jej temperatury, można zastosować równolegle zasilenia wszystkich komór filtra, rys. 3.





Rys.3. Schemat procesu ciągłej fermentacji; 1 – bioreaktor (chemostat), 2 – filtr dynamiczny RDF, S – pożywka, F – produkt.

## 2. Modelowanie mikrofiltracji dynamicznej

Przegląd modeli teoretycznych filtracji przez membrany przedstawiany jest w wielu publikacjach, np. w pracy (15). Modele są na ogół tworzone do opisu procesu ultrafiltracji, ale nie ma żadnych istotnych zastrzeżeń aby nie mogły znaleźć zastosowania w zakresie mikrofiltracji. W tym obszarze, jak się wydaje, najbardziej uzasadnione jest wykorzystanie modelu wywodzącego się z koncepcji oporu warstwy osadu szczątkowego. Na podstawie literatury oraz naszych własnych badań (2,3,11), przyjmujemy następujące założenia:

- podczas filtracji dynamicznej istnieją warunki powstawania unieruchomionej na powierzchni membrany warstwy osadu, którego grubość zależy od wartości naprężeń ścinających;
- warstwa osadu jest ściśliwa, siłą napędową procesu filtracji jest różnica ciśnień po obu stronach membrany;
- w ustalonych warunkach proces transportu cząstek zawiesiny w kierunku membrany jest równoważony wypieraniem cząstek w kierunku przeciwnym, otrzymujemy równanie modelowe filtracji dynamicznej RDF:

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu(B \tau^n \Delta P^s + R_m)} \quad (1)$$

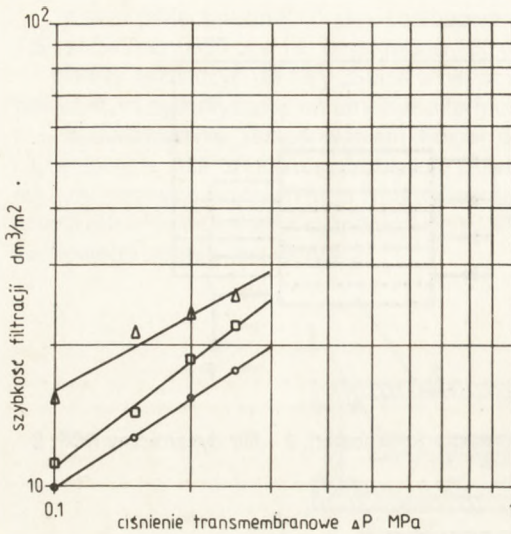
gdzie:  $J_v$  – natężenie przepływu filtratu,  $\Delta P$  – nadciśnienie,  $s$  – ściśliwość osadu,  $B$  – stała doświadczalna proporcjonalna do oporu właściwego osadu,  $\tau$  – naprężenie styczne na powierzchni membrany,  $n$  – wykładnik (stała),  $R_m$  – opór hydrauliczny membrany (w wielu wypadkach możliwy do pominięcia).

Interpretacja danych doświadczalnych filtracji zawiesin biologicznych na podstawie proponowanego modelu wymaga określenia pola naprężeń w komorze filtru. Półempiryczne metody wyznaczania wartości naprężeń na powierzchni wirującego dysku zostały podane dla obszaru laminarnego przez White'a (16), a dla burzliwego – w naszych pracach (13) oraz w pracy Shirato (14).

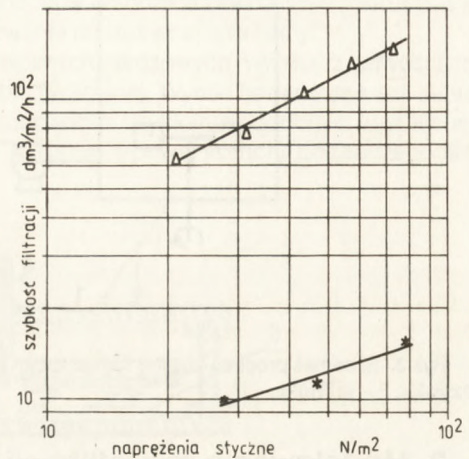
Dokładne obliczenie naprężeń jest możliwe jedynie w wyniku rozwiązania równań Navier–Stokesa dla przepływu osiowo–symetrycznego.

Zapoczątkowany przez nas sposób rozwiązania problemu oparty na metodzie elementów skończonych opisany został w pracach (11,15,16). Na podstawie badań filtracji zawiesin mikroorganizmów *Bacillus subtilis* i drożdży piekarnianych oraz obliczonych, średnich dla warunków przeprowadzonych pomiarów, wartości naprężeń ścinających, możliwe było określenie parametrów równania (1), a tym samym potwierdzenie przydatności proponowanego modelu, rys. 4.5.





Rys. 4. Filtracja zawiesiny mikroorganizmów *Bacillus subtilis*; wyznaczenie wykładników ściśliwości:  $\circ - \omega = 400$  obr/min,  $\square - \omega = 600$  obr/min,  $\Delta - \omega = 800$  obr/min, wartość  $s = 0,35$ .



Rys. 5. Filtracja zawiesin biologicznych. Wyznaczenie wykładnika  $n$ ; \* - *Bacillus subtilis*,  $P = 1$  bar,  $n = -0,42$ ,  $\Delta$  - drożdże piekarniane,  $P = 1$  bar,  $n = -0,71$ .

### 3. Podsumowanie

Efektywność procesu separacji zawiesin biologicznych w filtrach typu RDF jest, na obecnym etapie badań, niezadowalająca, z uwagi na znaczne koszty urządzeń i duże zapotrzebowanie energii. Dalsze badania nad zastosowaniem tych filtrów w biotechnologii powinny dotyczyć zagadnień:

- obniżenia kosztów ogólnych separacji, a zwłaszcza energochłonności procesu;
- poszukiwania nowych materiałów na przegrody filtracyjne (membran) odpornych na blokowanie powierzchni (*biofouling*) lub poszukiwania metod zapobiegających temu zjawisku;
- pogłębiania wiedzy w zakresie mechanizmu rozdzielania.

Można się jednak spodziewać, że początkowe trudności z zastosowaniem tych filtrów w biotechnologii zostaną pokonane, podobnie jak miało to miejsce w przypadku zastosowania filtracji dynamicznej w przemyśle nieorganicznym.

### Literatura

1. Wroński S., Mróz A., Ptasński K., (1980), Filtracja dynamiczna, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 5, 5.
2. Riesemeier B., Kroner K. H., Kula M. R., (1987), Studies on secondary layer formation and its characterization during cross-flow filtration of microbial cells, Jour. of Memb. Sci., 34, 245.
3. Murkes J., Carlsson C. B., (1988), Crossflow Filtration, John Wiley, New York.
4. Ripperger S., (1988), Verfahren zur Mikrofiltration von Prozesslösungen und ihre Anwendungen, Chem. Ing. Tech., 60, 3, 155-161.
5. Ripperger S., Schulz G., (1986), Microporous membranes in biotechnical application, Bioprocess Engineering, 1, 43-49.
6. Kroner K. H., Schutte H., Hustedt H., Kula M. R., (April 1984), Crossflow filtration in the downstream processing of enzymes, Process Biochemistry, 67-74.

7. Felder H., Kroner K., (10–11 April 1989), Dynamic biopressure filter. Down stream Processing in Biotechnology, Antwerp. Proceedings, 3.1–3.6.
8. Hildebrand J. R., Saxton J. B., (1987), The Use of Taylor Vortices in Protein Processing to Enhance Membrane Filtration Performance, Bioprocess Engineering Colloquium, Am. Soc. Mech. En.gr., New York, 93–96.
9. Hildebrand J. R., (November 1988), Integrated System Approaches to Membrane Operations in Bioprocessing, Biotech., USA 88, San Francisco, 14.
10. Wroński S., Molga E., Rudniak L., (1989), Dynamic filtration in biotechnology, Bioprocess Engineering, 3.
11. Wroński S., Rudniak L., Molga E., (September 1989), Resistance model of high–shear dynamic microfiltration, Filtech. Conf., Karlsruhe, Proceedings, 49–56.
12. Jaffrin M., (April 1990), Physical Principles of Plasma Separation Rotating Membrane. Theory and Application of Membranes, Int. Center of Biocybernetics, Seminar. Jabłonna.
13. Wroński S., Mróz A., (1984), Hydrodynamika tarczowych filtrów dynamicznych, Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 369–387.
14. Rudniak L., Wroński S., (June 1989), Dynamic microfiltration in biotechnology, Seminar Bioprocess Engineering, Institutes of Chem. Eng. of Technical University of Warsaw.
15. Wroński S., Rudniak L., (listopad 1989), Badania zastosowania filtracji dynamicznej w biotechnologii. Sprawozdanie z III etapu pracy CPBP 3.17 (koordynator: Instytut Biochemii Technicznej Politechniki Łódzkiej).
16. Wroński S., Rudniak L., (November 1989), Hydrodynamics of high–shear rotating dynamic filter. Arbeitssitzung des Fachausschusses „Mechanische Flüssigkeitsabtrennung“ der GVC–VDI, Würzburg.
17. Shirato M., Murase T., Yamasaki H., Iwata M., Inaoshi M., (April 1987), Patterns of flow in a filter chamber during dynamic filtration with a grooved disk, Int. Chem. Eng., 305–310.

## Dynamic filtration in biotechnology

### Summary

Principles of dynamic filters action and their application in separation of slurries in biotechnology have been presented. A modelling method of dynamic microfiltration has been described. Further developments of this method of separation have been discussed.

### *Adres dla korespondencji:*

Stanisław Wroński, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, ul. L. Waryńskiego 1, 00–645 Warszawa.