

TOMASZ GRYGIER  
ANDRZEJ NOWORYTA

Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

## Efektywność bioreaktora membranowego dla procesów z inhibicją

### Wstęp

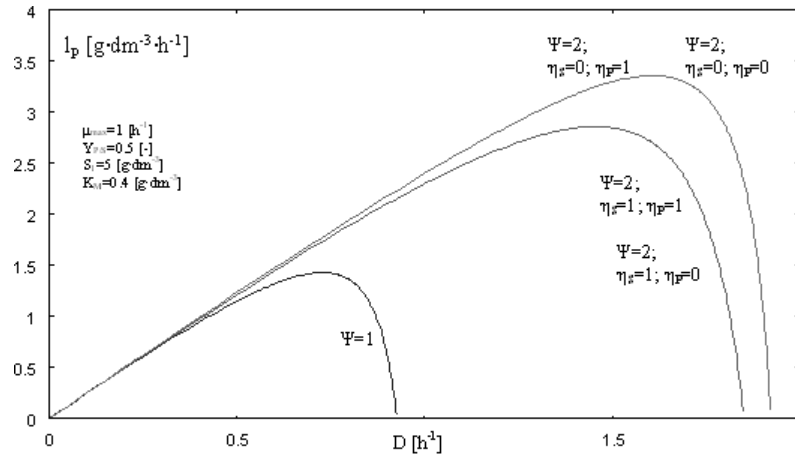
Bioreaktor membranowy jest urządzeniem integrującym przemianę biochemiczną (mikrobiologiczną) z separacją membranową. Wobec dużego zainteresowania tym rozwiązaniem aparaturowym zasadne staje się pytanie o szeroko rozumianą efektywność bioreaktora membranowego. W przypadku zastosowania jako biokatalizatora komórek mikroorganizmów efektywność taką można wyrazić przez produktywność biomasy albo produktu. Głównym celem niniejszej pracy jest określenie wpływu jaki ma na jego wartość rodzaj kinetyki oraz zastosowanie separacji membranowej. Omawiane zależności kinetyczne podzielono na trzy grupy: proste – prowadzące się do równania *Monoda*, z inhibicją substratem oraz inhibicją produktem. Szczególnie dwie ostatnie grupy są warte rozważenia, jako że praktycznie nie ma układu mikrobiologicznego wolnego od zjawisk inhibicji.

### Mikrobiologiczny bioreaktor membranowy

Do rozważań wybrano model bioreaktora membranowego sformułowany w pracy [1]. Głównym parametrem tego modelu jest współczynnik podziału strumieni  $\Psi$ , który wygodnie jest powiązać ze współczynnikiem podziału  $\eta_i$  w postaci funkcji podziału strumieni  $f(\Psi, \eta_i)$ :

$$f(\Psi, \eta_i) = 1 - \left(1 - \frac{1}{\Psi}\right)(1 - \eta_i) \quad (1)$$

Jednym z głównych efektów zastosowanego w bioreaktorze węzła separacji jest zagęszczenie biokatalizatora proporcjonalne do współczynnika podziału  $\Psi$ . Funkcja podziału  $f(\Psi, \eta_i)$  charakteryzuje wpływ węzła separacji na stężenia pozostałych składników.



Rys. 1. Porównanie produktywności w chemostacie i w bioreaktorze membranowym

Z racji szczególnego rozdzielania strumieni opuszczających reaktor wyrażenie na jego jednostkową zdolność produkcyjną określaną dalej w tekście skrótowo *produktywnością* przyjmuje postać:

$$l_p = \frac{f(\Psi, \eta_p)P}{\tau} = f(\Psi, \eta_p)PD \quad (2)$$

W celu wyznaczenia tej wielkości niezbędne jest określenie punktu pracy bioreaktora.

#### Produktywność dla przemiany określonej kinetyką *Monoda*

Równanie *Monoda* (6) rzadko w pełni charakteryzuje układ mikrobiologiczny mimo to w dalszym ciągu jest szeroko wykorzystywane do opisu przemian. Jego podstawową zaletą jest możliwość uzyskania analitycznych rozwiązań równań modelowych opisujących szereg aparatów służących do fermentacji czy biodegradacji.

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_M + S} \quad (3)$$

Niezbędna do określenia produktywności reaktora wartość stężenia produktu w punkcie pracy jest następująca:

$$P = \frac{Y_{P/S}}{f(\Psi, \eta_p)} \left[ S_1 - K_M f(\Psi, \eta_S) \frac{D}{\mu_{\max} \Psi - D} \right] \quad (4)$$

Wyprowadzenie wzoru (4) opiera się na zależności kinetycznej (3) oraz wyrażeniach bilansowych prezentowanych we wcześniejszych pracach [1, 2]. W celu znalezienia wartości maksymalnej produktywności należy zbadać kiedy pochodna produktywności po szybkości rozcieńczania przyjmuje wartość zero. I tak dla kinetyki *Monoda* jest to:

$$D_{OPT} = \mu_{\max} \Psi \left[ 1 - \sqrt{\frac{K_M f(\Psi, \eta_S)}{S_1 + K_M f(\Psi, \eta_S)}} \right] \quad (5)$$

Optymalny punkt pracy określa następujące stężenie:

$$P_{OPT} = \frac{Y_{P/S} \left\{ S_1 + K_M f(\Psi, \eta_S) - \sqrt{K_M f(\Psi, \eta_S) [S_1 + K_M f(\Psi, \eta_S)]} \right\}}{f(\Psi, \eta_p)} \quad (6)$$

Wartość maksymalnej produktywności wynosi zatem:

$$l_{p,\max} = \mu_{\max} \Psi Y_{P/S} \left\{ [S_1 + 2K_M f(\Psi, \eta_S)] + - 2\sqrt{K_M f(\Psi, \eta_S) [S_1 + K_M f(\Psi, \eta_S)]} \right\} \quad (7)$$

Na wykresie (Rys. 1) porównano wpływ szybkości rozcieńczania na osiągane produktywności w chemostacie ( $\Psi = 1$ ) i reaktorze membranowym ( $\Psi = 2$ ) dla wybranych parametrów. Zauważa się wzrost produktywności w bioreaktorze membranowym. Dodatkowo zwiększony efekt występuje, gdy membrana wykazuje selektywność względem substratu.

Selektywność względem produktu nie wpływa na osiągane wartości, jako że od stężenia produktu w kinetyce *Monoda* nie zależy szybkość przemiany.

#### Produktywność dla przemiany z inhibicją substratem

Jednym z najbardziej powszechnych równań opisujących inhibicję substratem jest:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{1}{\left(1 + \frac{K_M}{S}\right) \left(1 + \frac{S}{K_I}\right)} \quad (8)$$

Cechą charakterystyczną tego typu modeli wzrostu jest występowanie dwóch rozwiązań, z których stabilne jest tylko jedno. Niezbędna do wyliczenia produktywności wartość stężenia w stabilnym punkcie pracy, opisuje zależność:

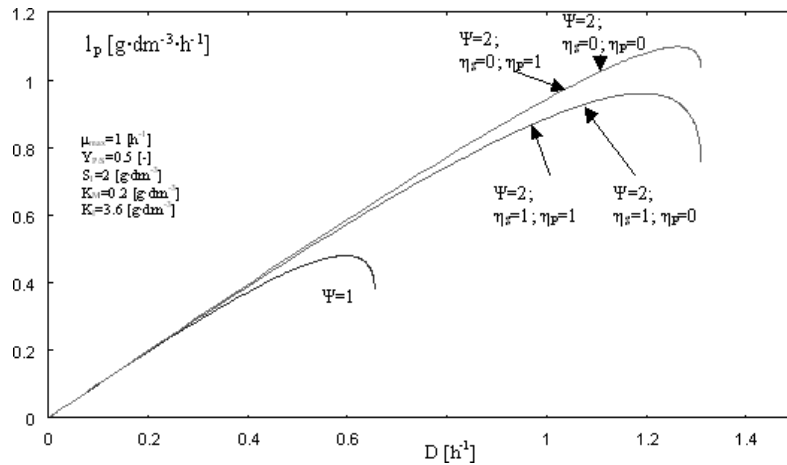
$$P = \frac{Y_{P/S}}{f(\Psi, \eta_p)} \left[ S_1 - \frac{K_1}{2} f(\Psi, \eta_S) \left( Z - \sqrt{Z^2 - 4 \frac{K_M}{K_I}} \right) \right] \quad (9)$$

gdzie:

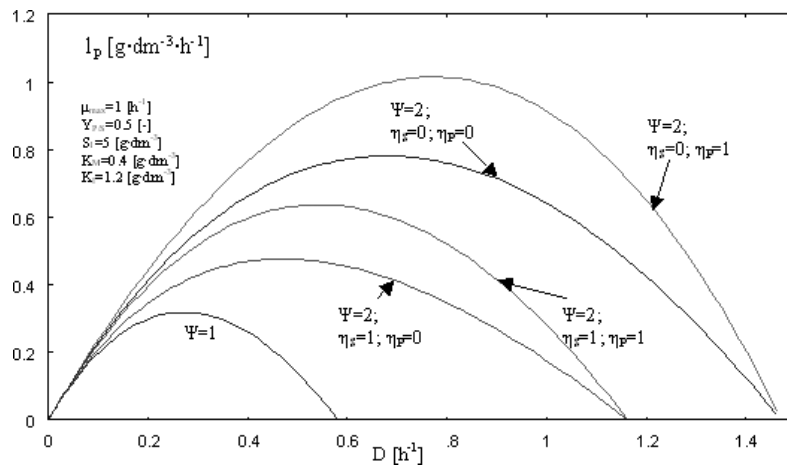
$$Z = \frac{\mu_{\max} \Psi}{D} - \frac{K_M}{K_I} - 1 \quad (10)$$

Wyrażenia na wartość optymalnej szybkości rozcieńczania oraz wartości stężeń w optymalnym punkcie pracy mają zbyt obszerną postać, stąd nie zamieszczono ich w niniejszej pracy. Wybrane wyniki analizy tych zależności przedyskutowano na wykresie (Rys. 2).

Podobnie jak w przypadku kinetyki *Monoda* rozwiązanie membranowe wpływa na zwiększenie możliwych do osiągnięcia wartości produktywności. Tak jak w poprzednim przypad-



Rys. 2. Produktywność dla procesu z inhibicją substratem



Rys. 3. Produktywność dla procesu z inhibicją produktem

ku tak i tutaj selektywność membrany względem produktu nie ma znaczenia. Pewnym ograniczeniem w zdolnościach intensyfikacyjnych reaktora dla tego układu jest jego drastyczne zachowanie w okolicach punktu maksymalnej produktywności mogące prowadzić do destabilizacji i wypłukania mikroorganizmów.

### Produktywność dla przemiany z inhibicją produktem

Przemianę charakteryzującą się kompetywną inhibicją produktem opisuje równanie:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_M \left( 1 + \frac{P}{K_I} \right) + S} \quad (11)$$

Stężenie produktu w punkcie pracy wynosi:

$$P = \frac{Y_{P/S}}{f(\Psi, \eta_P)} S_1 + \frac{Y_{P/S}}{f(\Psi, \eta_P)} \left[ \frac{S_1 Y_{P/S} + K_I f(\Psi, \eta_P)}{\left( \frac{\mu_{\max} \Psi}{D} - 1 \right) \frac{K_M}{K_I} f(\Psi, \eta_P) + Y_{P/S} f(\Psi, \eta_S)} \right] f(\Psi, \eta_S) \quad (12)$$

Analiza głównych parametrów pracy bioreaktora membranowego w tym przypadku została przedstawiona na wykresie (Rys. 3). Widoczny jest wzrost efektywności w bioreaktorze membranowym ( $\Psi = 2$ ) oraz wpływ selektywności membrany

względem poszczególnych składników. Ponieważ tym razem stężenie produktu jest czynnikiem decydującym o szybkości przemiany zatrzymanie go na membranie powoduje spadek produktywności reaktora. Odwrotny efekt widoczny jest dla substratu.

### Wnioski

Bioreaktor membranowy umożliwia zwiększenie efektywności w dowolnym układzie mikrobiologicznym. Decydujące znaczenie ma tu zdolność separacji biokatalizatora. Sелеktywność względem innych składników limitujących kinetykę również odgrywa istotną rolę w intensyfikacji procesu.

### Oznaczenia

- $D$  – szybkość rozcieńczenia [ $\text{h}^{-1}$ ]
- $K_M, K_I$  – stałe kinetyczne [ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ]
- $l_p$  – produktywność [ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ]
- $S, P, X$  – stężenia: substrat, produkt, biomasa [ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ]
- $Y_{P/S}$  – współczynnik wydajności produktu [-]
- $\eta_i$  – współczynnik podziału [-]
- $\mu$  – właściwa szybkość wzrostu [ $\text{h}^{-1}$ ]
- $\tau$  – czas przebywania [h]

### LITERATURA

1. A. Trusek-Hołownia: Monografie Komitetu Inż. Środ. PAN, **36**, 123, (2006).
2. T. Grygier, A. Noworyta: Inż. Chem. i Proc., **27**, 1387 (2006).

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy N N208 020234.**