

Bolesław TABIŚ, Robert GRZYWACZ

e-mail: btabis@usk.pk.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Wpływ zatrzymania biomasy na warunki pracy kolumnowych bioreaktorów barbotażowych z recyrkulacją

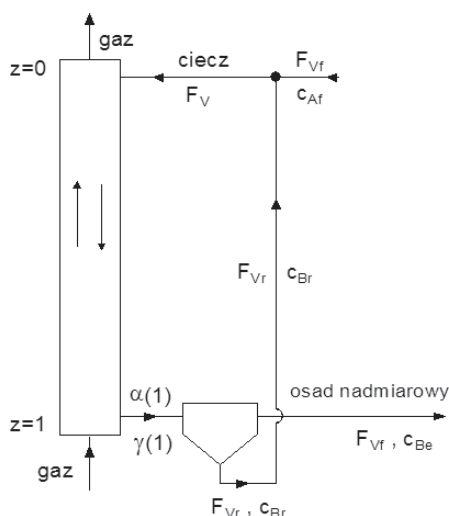
Wstęp

Z punktu widzenia kinetyki niestrukturalnej, procesy mikrobiologiczne są podobne do reakcji autokatalicznych. Rolę autokatalizatora pełni w nich powstająca populacja mikroorganizmów. Z tego powodu w aparatach o przepływie charakteryzującym się dostatecznie dużą wartością liczby *Pecleta*, a w szczególności w reaktorach o przepływie tłokowym, reakcje autokataliczne, ani procesy mikrobiologiczne nie mogą być prowadzone. Procesy takie wymagają reaktorów o innej konfiguracji lub o innym charakterze przepływu.

Według sugestii *Chisti* [1], jeżeli liczba *Pecleta* dla fazy ciekłej $Pe > 20$, to do modelowania bioreaktora można przyjąć założenie o przepływie tłokowym. Aby utrzymać zdolność produkcyjną takich aparatów na zadanym poziomie i nie doprowadzić do wymycia mikroorganizmów, stosuje się wówczas recyrkulację części strumienia. Zastosowanie zagęszczania biomasy ma głównie na celu odprowadzanie osadu nadmiarowego. Poza różnymi formami immobilizacji, recyrkulacja jest jednym ze sposobów pozwalających na utrzymanie dostatecznie wysokiego stężenia mikroorganizmów w obszarze reakcyjnym, zwłaszcza dla większych natężeń przepływu [2, 3]. W ten sposób reaktor nie jest zasilany sterylnym surowcem, bowiem strumień zasilający aparat zawiera już pewną ilość biomasy. Wykazano, że powoduje to zwiększenie zdolności produkcyjnej instalacji oraz czyni ją bardziej odporną na wymycie mikroorganizmów.

Model bioreaktora i algorytm wyznaczania stanów stacjonarnych

Przedmiotem analizy jest aerobowy proces mikrobiologiczny przebiegający w aparacie typu kolumnowego, jak to pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat bioreaktora kolumnowego z recyrkulacją i zagęszczaniem biomasy wraz z podstawowymi oznaczeniami

Według podobnego schematu pracują również poziome kanały napowietrzające o jednorodnym napowietrzaniu wzdłuż całej ich długości [4]. Stan stacjonarny takiego reaktora opisuje się następującym układem równań różniczkowych:

$$\frac{d\alpha}{dz} = \tau_c r_A(\alpha, \beta, \gamma) \quad (1a)$$

$$\frac{d\beta}{dz} = \tau_c r_B(\alpha, \beta, \gamma) \quad (1b)$$

$$\frac{d\gamma}{dz} = -\tau_c r_T(\alpha, \beta, \gamma) + a_1(a_2\delta - \gamma) \quad (1c)$$

$$\frac{d\delta}{dz} = a_3(a_2\delta - \gamma) \quad (1d)$$

Parametry a_1 , a_2 i a_3 występujące w równaniach (1) są zdefiniowane następująco:

$$a_1 = \frac{\tau_c a k_m}{(1 - \varepsilon)} \quad a_2 = \frac{c_{T, gf}}{c_{Af} K} \quad a_3 = \tau_g a k_m \frac{c_{Af}}{c_{T, gf}}$$

$$\tau_c = \frac{H}{u_c} \quad \tau_g = \frac{H}{\varepsilon u_g}$$

Ponieważ równania (1) opisują bioreaktor z częściowym zagęszczaniem i recyrkulacją biomasy, wobec tego warunki brzegowe związane z tymi równaniami przyjmą postać:

$$\alpha(0) = \zeta\alpha(1) \quad (2a)$$

$$\beta(0) = [1 - (1 - \zeta)(1 - \eta)]\beta(1) \quad (2b)$$

$$\gamma(0) = (1 - \zeta)\gamma_f \quad (2c)$$

$$\delta(1) = 1 \quad (2d)$$

gdzie $\zeta = \frac{F_{Vr}}{F_V}$, natomiast $\eta = \frac{c_B(1) - c_{Be}}{c_B(1)}$.

Z postaci warunków (2) wynika, że układ równań (1)-(2) stanowi zagadnienie brzegowe. Algorytm jego rozwiązania przedstawia się następująco:

- przyjmując $\alpha(1) = x_1$; $\beta(1) = x_2$; $\delta(0) = x_3$;
- obliczyć wartości $\alpha(0)$, $\beta(0)$, $\gamma(0)$ według zależności (2);
- scałkować układ czterech równań różniczkowych (1) w przedziale od $z = 0$ do $z = 1$;
- obliczyć $f_1 = \alpha(1) - x_1$, $f_2 = \beta(1) - x_2$, $f_3 = \delta(1) - 1$
- za pomocą nadrzędnego algorytmu, np. *Newtona* poprawiać wartości x_1, x_2, x_3 , aż do spełnienia warunku $\|F(x)\| < 10^{-8}$, gdzie $F = [f_1, f_2, f_3]^T$.

Określenie wpływu zatrzymania biomasy na warunki pracy aparatu

O szybkości aerobowego procesu mikrobiologicznego decyduje, poza stężeniem substratu węglowego, również stężenie rozpuszczonego tlenu i stężenie biomasy. W bioreaktorach pracujących z osadem czynnym stężenie biomasy można zwiększyć na dwa sposoby:

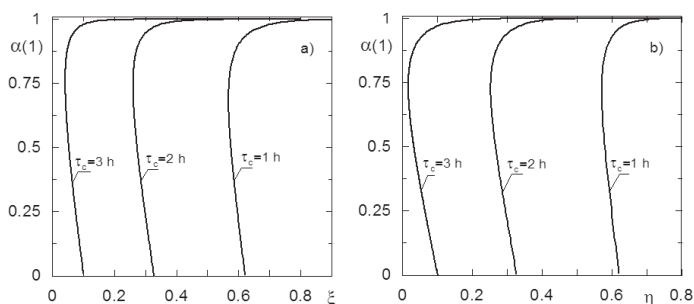
- poprzez recyrkulację części strumienia produktów,
- poprzez zagęszczanie biomasy.

W praktyce należy stosować obydwa sposoby jednocześnie, bowiem daje to większe możliwości sterowania procesem. Z tego powodu w pracy dokonano ilościowej analizy wpływu obydwu wspomnianych sposobów na warunki pracy bioreaktora. W szczególności określono gra-

niczne wartości współczynnika recyrkulacji ξ oraz stopnia zagęszczenia biomasy η , przy których następuje wymywanie mikroorganizmów i nieodwracalna utrata zdolności produkcyjnej bioreaktora. Aby aparat mógł dalej pełnić przewidzianą mu rolę musi być na nowo szczepiony mikroorganizmami i na nowo uruchamiany. Dlatego określenie granic wymycia biomasy jest jednym z podstawowych zadań przy projektowaniu każdego bioreaktora przepływowego.

W charakterze przykładu procesowego rozpatrzono aerobową biodegradację fenolu w obecności bakterii *Pseudomonas putida*, przebiegającą według kinetyki dwusubstratowej, zaproponowanej przez Sekera i współautorów [5].

Na rys. 2 przedstawiono graficznie wpływ współczynnika recyrkulacji (Rys. 2a) oraz stopnia zagęszczenia biomasy (Rys. 2b) na wartość stopnia przemiany substratu węglowego $\alpha(1)$ w strumieniu opuszczającym reaktor. Ta wielkość decyduje bowiem o sprawności i wydajności instalacji.

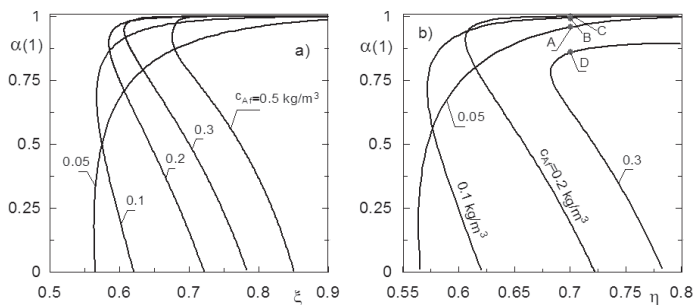


Rys. 2. Gałęzie stanów stacjonarnych $[\alpha(1), \xi]$ oraz $[\alpha(1), \eta]$ wyznaczone dla kilku wartości czasu przebywania cieczy w aparacie ($u_{0g} = 0,01$ m/s; $c_{Af} = 0,1$ kg/m³)

Wyniki otrzymano metodą kontynuacji rozwiązań zagadnienia brzegowego [6] dla kilku wartości czasu przebywania cieczy w bioreaktorze. Czas przebywania jest parametrem łatwym do sterowania, dlatego uwzględnienie tej wielkości jest uzasadnione z ruchowego punktu widzenia.

Jak wynika z położenia gałęzi stanów stacjonarnych przedstawionych na rys. 2, wpływ obydwu parametrów, tj. współczynnika recyrkulacji ξ i stopnia zagęszczenia biomasy η kształtuje się jakościowo w podobny sposób. Przede wszystkim stwierdza się, że niezależnie od pozostałych parametrów procesu, zawsze istnieją graniczne, minimalne wartości obydwu wymienionych parametrów, poniżej których następuje nieodwracalne wymycie biomasy i utrata zdolności produkcyjnej bioreaktora. Te wartości graniczne rosną w miarę jak maleje średni czas przebywania, tzn. w miarę wzrostu natężenia przepływu przez reaktor. Jest to zjawisko uzasadnione z kinetycznego punktu widzenia.

Ważnym parametrem procesowym wpływającym na obciążenie bioreaktora toksycznym surowcem jest stężenie substratu węglowego w strumieniu zasilającym instalację. Dlatego na rys. 3 przedstawiono rodziny gałęzi stanów stacjonarnych $[\xi, \alpha(1)]$ oraz $[\eta, \alpha(1)]$ dla pewnego zbioru wartości stężenia substratu c_{Af}



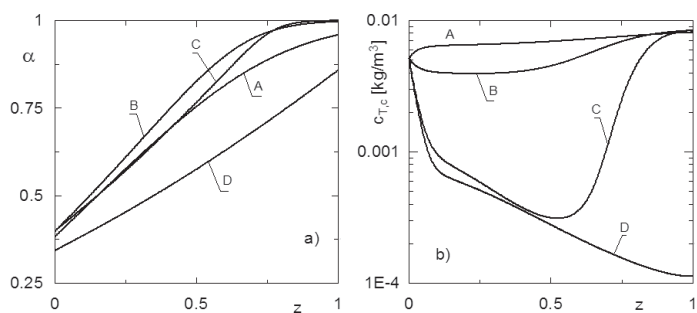
Rys. 3. Gałęzie stanów stacjonarnych $[\alpha(1), \xi]$ oraz $[\alpha(1), \eta]$ wyznaczone dla kilku wartości stężenia substratu węglowego c_{Af} ($u_{0g} = 0,01$ m/s; $\tau_c = 1$ h)

Szybkość procesu biodegradacji jest nieliniową funkcją stężenia substratu węglowego, ponadto, zgodnie z równaniami Sekera i współau-

torów [5], przy większych stężeniach obserwuje się jego inhibitujący wpływ na rozwój mikroorganizmów. Z tego powodu należy oczekiwać, iż wpływ stężenia substratu będzie miał inny charakter, niż wpływ omawianej wcześniej wielkości ruchowej.

Położenie i kształt pojedynczej gałęzi $[\zeta, \alpha(1)]$ lub $[\eta, \alpha(1)]$ jest łatwe do zinterpretowania, zwłaszcza dla niskich wartości c_{Af} . Wtedy bowiem powiększanie zatrzymania biomasy, niezależnie od jego sposobu, tzn. zarówno poprzez recyrkulację (parametr ζ), jak i zagęszczenie biomasy (parametr η) powoduje praktycznie monotoniczny wzrost stopnia przemiany substratu $\alpha(1)$. Dla większych obciążeń bioreaktora substratem węglowym obserwuje się jego inhibitujący wpływ na szybkość procesu i dlatego pojawiają się wielokrotne stany stacjonarne. Ponadto graniczne, minimalne wartości parametrów ζ oraz η , dla których następuje wymycie mikroorganizmów przesuwają się w stronę większych ich wartości wraz ze wzrostem stężenia substratu c_{Af} . Również i to spostrzeżenie można zinterpretować w oparciu o analizę kinetyczną procesu. Przy większych obciążeniach substratem węglowym wymagane jest większe stężenie biomasy w celu zapewnienia wymaganej zdolności produkcyjnej obiektu. Jednak taka bezpośrednia interpretacja zawodzi przy większych stężeniach substratu c_{Af} . Wtedy bowiem obserwuje się zróżnicowany wpływ recyrkulacji i zagęszczenia biomasy. Zwiększanie strumienia recyrkulowanego przy ustalonym stopniu zagęszczenia biomasy oznacza częściowe rozcieńczenie surowca, a więc i zmniejszanie stężenia substratów w strumieniu wpływającym do aparatu. Powoduje to zmniejszenie szybkości procesu w całym aparacie, ale z punktu widzenia natlenienia środowiska nie jest to okolicznością niekorzystna. Natomiast powiększanie jedynie stopnia zagęszczenia biomasy nie daje efektu rozcieńczenia; prowadzi tylko do wzrostu stężenia mikroorganizmów. Powoduje to proporcjonalny wzrost szybkości biodegradacji. Wtedy może nastąpić wyraźny spadek stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy. To z kolei prowadzi do obniżenia stopnia przemiany substratu węglowego. Zjawisko takie obserwuje się na rys. 3b dla $c_{Af} = 0,3$ kg/m³ w postaci obniżenia położenia gałęzi stanów stacjonarnych $[\eta, \alpha(1)]$.

Potwierdzenie tej hipotezy zilustrowano graficznie na rys. 4, na którym pokazano rozkłady stopnia przemiany substratu węglowego $\alpha(z)$ oraz stężenia tlenu rozpuszczonego $c_{T,c}(z)$ dla czterech wybranych warunków pracy aparatu oznaczonych punktami A, B, C i D na rys. 3b oraz na rys. 4.



Rys. 4. Rozkłady stopnia przemiany $\alpha(z)$ oraz stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy $c_{T,c}$ dla wybranych warunków pracy aparatu oznaczonych punktami A, B, C i D na rys. 3b ($u_{0g} = 0,01$ m/s; $\tau_c = 1$ h; $\zeta = 0,4$; $\eta = 0,7$)

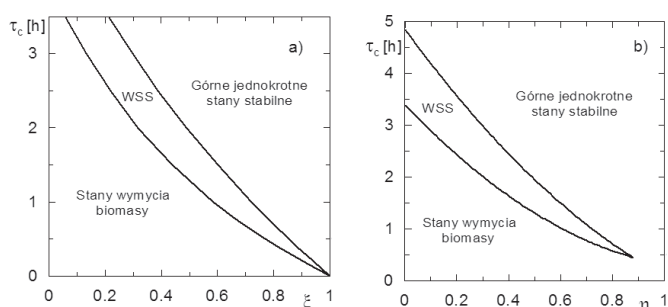
Według literatury [7] ocenia się, że jeśli stężenie tlenu rozpuszczonego jest mniejsze niż $5 \cdot 10^{-4}$ kg/m³, to może nastąpić niedotlenienie mikroorganizmów i załamanie efektywności biodegradacji. Z położenia rozkładów $c_{T,c}(z)$ zamieszczonych na rys. 4b wynika, że rzeczywiście w końcowej części aparatu następuje obniżenie stężenia tlenu w cieczy poniżej wspomnianej granicy. To z kolei obniża zdolność instalacji do biodegradacji, czego ilościową miarą jest spadek stopnia przemiany substratu węglowego $\alpha(z)$, jak to obrazuje krzywa „D” na rys. 4a.

Z przedstawionego tu rozumowania wynika, że przy danych warunkach pracy aparatu określonych natężeniem przepływu substratu i jego stężeniem oraz warunkami napowietrzania, istnieje pewien przedział wartości stopnia zagęszczenia biomasy, który znajduje uzasadnienie procesowe. Zatem powinien być określony dla każdego procesu mikro-

biologicznego. Jeżeli znane są równania kinetyczne danego procesu, to wówczas przedział ten może zostać wyznaczony na drodze rachunkowej.

Na każdej z gałęzi stanów stacjonarnych [ξ , $\alpha(1)$] oraz [η , $\alpha(1)$] przedstawionych na rys. 2 i na rys. 3 istnieją dwa charakterystyczne punkty, mające znaczenie praktyczne. Są to: punkt zwrotny wyznaczający warunek wymycia biomasy i punkt przecięcia danej gałęzi z osią odciętych, zwany punktem bifurkacji statycznej. Pomiedzy odciętymi odpowiadającymi tym punktom istnieje obszar stanów wielokrotnych analizowanego bioreaktora.

Globalnej analizie wpływu parametrów ξ oraz η decydujących o stopniu zatrzymania biomasy w aparacie można dokonać sporządzając wykresy położenia obydwu wspomnianych punktów charakterystycznych, w zależności od czasu przebywania cieczy τ_c i od stężenia substratu węglowego c_{Af} . Wykresy takie przedstawiono odpowiednio na rys. 5a oraz na rys. 5b.



Rys. 5. Struktura stanów stacjonarnych bioreaktora przedstawiająca obszary pojedynczych i wielokrotnych (WSS) stanów stacjonarnych oraz obszary wymycia biomasy ($u_{0g} = 0,01$ m/s; $c_{Af} = 0,2$ kg/m³)

Z punktu widzenia bezpieczeństwa procesowego zaleca się prowadzenie procesu w obszarze jednokrotnych górnych stabilnych stanów stacjonarnych. Z kolei położenie dolnej krzywej granicznej na rys. 5a i rys. 5b rozdzielającej obszar stanów wielokrotnych (WSS) od obszaru wymycia biomasy określa zakres stosowalności aparatu dla danego procesu mikrobiologicznego.

Wnioski

Wykazano, że zastosowanie recyrkulacji strumienia z częściowym zagęszczaniem biomasy jest skutecznym sposobem utrzymania stężenia mikroorganizmów na poziomie pozwalającym na prowadzenie procesu aerobowego w bioreaktorze z łokowym przepływem cieczy. Istnieją jednak graniczne, minimalne wartości współczynnika recyrkulacji i stopnia zagęszczania biomasy, poniżej których następuje wymycie biomasy i nieodwracalna utrata zdolności przerobowej reaktora. Położenie tych wartości granicznych zależy od obciążenia bioreaktora substratem węglowym.

Wpływ obydwu parametrów decydujących o stopniu zatrzymania biomasy, tj. współczynnika recyrkulacji i stopnia zagęszczania biomasy jest odmienny. Z technologicznego punktu widzenia istnieje bowiem tylko jedna, minimalna wartość współczynnika recyrkulacji, decydują-

ca o możliwości prowadzenia procesu. Natomiast stopień zagęszczania biomasy posiada zarówno wartość minimalną, odpowiadającą wymyciu mikroorganizmów, jak i wartość maksymalną, ujawniającą się przy większych stężeniu substratu węglowego; wtedy dochodzi bowiem do niedotlenienia mikroorganizmów i niekorzystny spadek stopnia przemiany substratu.

Określono obszary występowania wielokrotnych stanów stacjonarnych analizowanego bioreaktora. Znajomość położenia tych obszarów jest podstawą doboru bezpiecznych warunków pracy instalacji. Jeżeli jest znana kinetyka danego procesu mikrobiologicznego, to wówczas obszary te można wyznaczyć na drodze rachunkowej korzystając z zaproponowanego modelu bioreaktora.

Oznaczenia

- ak_m – objętościowy współczynnik wnikania tlenu z powietrza do fazy ciekłej, [1/s]
- c_A, c_B, c_T – stężenie odpowiednio substratu węglowego, biomasy i tlenu, [kg/m³]
- F_V – objętościowe natężenie przepływu cieczy przez bioreaktor, [m³/s]
- H_0 – wysokość słupa cieczy nienagazowanej, [m]
- K – stała równowagi międzyfazowej dla tlenu
- r_A, r_T – szybkość zużywania odpowiednio substratu węglowego i tlenu, [kg/(m³·h)]
- r_B – szybkość przyrostu biomasy, [kg/(m³·h)]
- WSS – wielokrotne stany stacjonarne
- z – bezwymiarowa współrzędna wysokości bioreaktora
- α – stopień przemiany substratu węglowego, $\alpha = (c_{Af} - c_A)/c_{Af}$
- β – stężenie odniesienia mikroorganizmów, $\beta = c_B/c_{Af}$ [kg biomasy/kg substr. węgl.]
- γ – stężenie odniesienia tlenu w cieczy, $\gamma = c_{T,c}/c_{Af}$ [kg tlenu/kg substr. węgl.]
- δ – bezwymiarowe stężenie tlenu w fazie gazowej, $\delta = c_{T,g}/c_{T,gf}$
- ε – stopień zatrzymania gazu
- η – stopień zagęszczania biomasy
- τ_c, τ_g – średni czas przebywania odpowiednio fazy ciekłej i gazowej w aparacie, [h]
- ζ – współczynnik recyrkulacji

Indeksy

- c – faza ciekła
- e – strumień opuszczający instalację
- f – strumień zasilający
- g – faza gazowa
- r – strumień recyrkulacyjny

LITERATURA

- [1] Y. Chisti: Airlift bioreactors, Elsevier, New York 1989.
- [2] A. Ajbar: Wat. Res., 35, 1201 (2001).