

MAREK SOLECKI

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Modelowanie procesu dezintegracji mikroorganizmów w młynach perełkowych

Wstęp

Związki zawarte we wnętrzu komórek mikroorganizmów mają duże komercyjne znaczenie. Ich wyodrębnianie wymaga zniszczenia ścian komórkowych i błon cytoplazmatycznych. Na skalę przemysłową proces dezintegracji drobnoustrojów przeprowadzany jest między innymi w młynach perełkowych. Młyn perełkowy stanowi zbiornik wypełniony kulkami wprawianymi w ruch cyrkulacyjny wirującym mieszadłem. Rozproszone w cieczy mikroorganizmy są rozrywane w wyniku oddziaływania na nie elementów wypełnienia. W trakcie procesu następuje rozrywanie ścian komórkowych mikroorganizmów, uwalnianie i roztwarzanie w fazie ciągłej związków wewnątrzkomórkowych, mikromielenie ścian komórkowych, cięcie uwolnionych związków wielkocząsteczkowych, wzajemne oddziaływanie uwolnionych enzymów.

Curie i inni [1] po raz pierwszy opisali kinetykę procesu zależnością liniową. Model logiczny oparty na analogii do teorii kinetyki gazów opracowany został przez Melendresa i innych [2]. Model fenomenologiczny oparty na przepływie masy pomiędzy dwiema objętościami opracowany został przez Heima i Soleckiego [3]. Nieliniowy model uwalniania związków wewnątrzkomórkowych opracowali Melendres i inni [4]. Nieliniowość procesu spowodowaną zmianami warunków dezintegracji modelowali Heim i inni [5]. Nieliniowy model procesu dezintegracji ujmujący efekt zanikania kolejno największych frakcji rozmiarowych przedstawił Solecki [6, 7]. Celem pracy było sporządzenie modelu procesu dezintegracji mikroorganizmów w młynie perełkowym, pozwalającego na zjawiskowe ujęcie w opisie wpływu czynników takich, jak zróżnicowana wielkość mikroorganizmów. Niedostatkami jedynego modelu umożliwiającego taki opis jest uproszczenie eliminujące zjawisko niszczenia mikroorganizmów bez wytwarzania przez elementy wypełnienia objętości niedostępnej dla mikroorganizmów [3, 8].

Model procesu

Założono kulisty kształt i zróżnicowaną wielkość komórek mikroorganizmów. Ich rozmiar określono średnicą d_i . Przyjęto, że mikroorganizmy są dużo mniejsze od elementów wypełnienia młyna d_k .

$$d_i < d_k \quad (1)$$

Dla całej populacji drobnoustrojów poddawanych dezintegracji założono jednakową wytrzymałość mechaniczną ścian komórkowych i jednakową ściśliwość płynów przez nie chronionych.

W komorze roboczej młyna mikroorganizmy niszczone są między dwiema powierzchniami należącymi do różnych ciał stałych. Jedną z nich stanowi pojedynczy element wypełnie-

nia, a drugą inny element wypełnienia albo element komory roboczej młyna. Może to być powierzchnia wewnętrzna zbiornika o średnicy D albo mieszadła o średnicy wału d_w . Ze względu na relacje (1) oraz:

$$d_k < D \quad (2)$$

$$d_k < d_w \quad (3)$$

w rozważaniach przyjęto, że wszystkie powierzchnie wewnętrzne młyna są płaszczyznami.

Przyjęto, że mikroorganizmy są niszczone w wyniku rozrywania ścian spowodowanych obciążeniem ściskającym komórkę. Założono, że rozerwanie ścian występuje wtedy, gdy możliwe jest wypłynięcie na zewnątrz związków zawartych we wnętrzu komórki. Taki stan jest równoznaczny ze zdeintegrowaniem komórki. Wyróżniono następujące fazy niszczenia drobnoustrojów: 1) kontakt, 2) odkształcanie komórki, 3) rozerwanie ścian komórkowych.

Podczas pierwszej fazy dochodzi do punktowego kontaktu pomiędzy komórką o średnicy d_i a dwoma powierzchniami niszczącymi. Komórka nie ulega odkształceniu. Punkty styczności ciał stałych z komórką d_i nazwano punktami niszczącymi tworzącymi pojedynczy układ niszczenia. Odcinek łączący punkty niszczące komórkę d_i określono jako oś niszczenia. W drugiej fazie na skutek zbliżania się powierzchni niszczących komórka się odkształca. Zwiększa się opisywana średnicą δ_i powierzchnia kontaktu komórki z ciałami stałymi. Rozerwanie ścian komórki o średnicy d_i następuje po zbliżeniu powierzchni ściskających w trzeciej fazie na odległość niszczenia l_i opisaną zależnością (4).

$$l_i < d_i \quad (4)$$

Odległość niszczenia jest mierzona wzdłuż osi niszczenia. Przyjęto, że powierzchnię styku komórka-powierzchnia niszcząca w momencie rozerwania ścian opisuje średnica $\delta_{i \max}$.

Rozrywanie rozproszonych w cieczy komórek następuje po przemieszczeniu ich do miejsca wytwarzanego pojedynczego układu niszczącego. Założono ciągłość powierzchni niszczenia dla zbioru punktów należących do otoczenia kołowego o średnicy δ wokół punktu niszczenia. Co najmniej jedna powierzchnia niszcząca ma kształt sferyczny. Stąd wynika możliwość wytwarzania w młynie przez dwa elementy pojedynczych osi niszczenia lub zbiorów osi niszczenia stanowiących powierzchnię walcową. Ograniczona nią i obiema powierzchniami niszczenia objętość zawiesziny $V_{\beta i}$ jest niedostępna dla żywych komórek o średnicy nie mniejszej od d_i .

Podczas ściskania komórki o średnicy d_i następuje jej odkształcanie. Przy dostatecznie dużym odkształceniu następuje rozerwanie ścian komórkowych. Objętość niszczenia $V_{\beta i}$ zdefiniowano jako objętość ograniczoną powierzchniami niszc-

czenia i powierzchnią walcową o średnicy δ i osi symetrii zgodnej z osią niszczenia.

Ze względu na duży stopień wypełnienia młyna kulkami i dużą intensywność cyrkulacji wypełnienia, wynikającą z dużych prędkości obrotowych mieszadła przyjęto, że: 1) suma wszystkich objętości $V_{\beta i}$ jest stała (5), 2) suma wszystkich objętości $V_{\delta i}$ jest stała (6).

$$\sum V_{\beta i} = \text{const} \quad (5)$$

$$\sum V_{\delta i} = \text{const} \quad (6)$$

Objętość komory roboczej zajmowana przez zawieszinę określona jest zależnością:

$$V = V_{\alpha} + V_{\beta} + V_{\delta} \quad (7)$$

W objętości V_{α} panują warunki bezpieczne dla mikroorganizmów i zachodzi intensywne mieszanie. Objętości V_{β} i V_{δ} opisują odpowiednio wzory (8) a (9).

$$V_{\beta} = V_{\beta i} \quad (8)$$

$$V_{\delta} = \sum V_{\delta i} \quad (9)$$

Opis niszczenia zbioru komórek zawartych w zawieszinie ma postać równania (10).

$$dN = k(N_0 - N)dt \quad (10)$$

Przez N_0 oznaczono początkową liczbę komórek a przez N liczbę komórek po czasie t trwania procesu. Stałą szybkości procesu określa zależność:

$$k = \frac{\sum F_{\delta i} u_i + \sum F_{\beta i} u_i}{V_{\alpha}} \quad (11)$$

$F_{\delta i}$ oznacza powierzchnię przez którą wprowadzana jest komórka do objętości niszczenia $V_{\delta i}$ w przypadku wytworzenia pojedynczej osi niszczenia. $F_{\beta i}$ oznacza tą część powierzchni $V_{\beta i}$, przez którą wprowadzane są mikroorganizmy do objętości $V_{\delta i}$ w przypadku wytworzenia zbioru osi niszczenia o kształcie powierzchni walcowej. Prędkość u_i jest lokalną prędkością przemieszczania komórek do objętości niszczenia $V_{\delta i}$. Jeżeli podzielimy zbiór komórek na n frakcji rozmiarowych to przebieg procesu opisuje równanie:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n dN_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j (N_{0j} - N_j) dt \quad (12)$$

Dyskusja

Z równania (10) po prostych przekształceniach otrzymujemy liniową zależność (13). Jest ona zgodna z modelami stosowanymi we wcześniejszych pracach [1–5].

$$\ln \frac{N_0}{N} = kt \quad (13)$$

Analogiczną otrzymujemy linię regresji (14) z równania (12):

$$\frac{1}{n} \ln \left(\prod_{j=1}^n \frac{N_{0j}}{N_j} \right) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j t \quad (14)$$

Zależność (14) umożliwia modelowanie przebiegu procesu, tak dla pojedynczej frakcji rozmiarowej komórek, jak i dla całej populacji mikroorganizmów poddanych dezintegracji. Przy bardzo małej liczbie początkowej mikroorganizmów

w zawieszinie N_0 może wystąpić zanikanie w trakcie procesu kolejno największych frakcji rozmiarowych komórek. W takim przypadku przebieg procesu opisany całościowo zależnością (14) będzie nieliniowy podczas, gdy kinetyka dezintegracji mikroorganizmów w poszczególnych frakcjach będzie liniowa [7].

Przedstawiony model pozwala na ujęcia w opisie procesu niszczenia komórek według różnych mechanizmów [7, 8], wpływu różnej wytrzymałości mikroorganizmów oraz ich zróżnicowanej postaci morfologicznej. Wyprowadzona zależność na stałą szybkości k (11) daje podstawy dokonania optymalizacji wypełnienia młyna i warunków jego pracy.

Jednakową wytrzymałość mechaniczną wszystkich komórek założono w celu uproszczenia opisu modelowania procesu w tej pracy. Parametry wytrzymałościowe mikroorganizmów takie jak grubość, struktura i skład ścian komórkowych czy ich wytrzymałość na rozciąganie niewątpliwie mają wpływ na przebieg procesu i można je ująć w proponowanym modelu. Indywidualne cechy wytrzymałościowe będą miały największe znaczenie podczas niszczenia mikroorganizmów o zbliżonej wielkości. Przy znacznym zróżnicowaniu wielkości drobnoustrojów, tak jak w przypadku drożdży *Saccharomyces cerevisiae* [2, 7], własności wytrzymałościowe komórek będą odgrywały rolę drugorzędą.

Wnioski

Zaprezentowany sposób modelowania procesu dezintegracji mikroorganizmów w młynach perełkowych przy niewielkiej komplikacji daje dużo korzyści:

1. Pozwala na ujęcie w opisie większej liczby zjawisk w porównaniu z modelem opartym na cyrkulowaniu zawiesiny tylko pomiędzy objętością V_{α} i V_{β} . Możliwe jest uwzględnienie rozrywania komórek bez dalszego ich przemieszczania do objętości V_{β} , a nawet niszczenia komórek przez elementy wypełnienia bez wytwarzania objętości V_{β} .
2. Pozwala na ujęcie wpływu na przebieg procesu przykładowo takich czynników, jak zróżnicowana wielkość, wytrzymałość i postać morfologiczna komórek.
3. Umożliwia opisywanie przebiegów liniowych i nieliniowych procesu.
4. Pozwala na korzystniejsze uwzględnienie w opisie różnych mechanizmów niszczenia drobnoustrojów (walcowanie, rozcieranie, zderzenie) w porównaniu z innymi modelami.
5. Daje podstawy do przeprowadzenia dogodniejszej matematycznej optymalizacji warunków pracy młyna w porównaniu z innymi modelami.

LITERATURA

1. J.A. Currie, P. Dunnill, M.D. Lilly: *Biotechnol. Bioeng.* 14, 623 (1972).
2. A.V. Melendres, H. Honda, N. Shiragami, H. Unno: *Bioseparation* 2, 231 (1991).
3. A. Heim, M. Solecki: *World Congress on Particle Technology* 3, Brighton, pp. 10 (1998).
4. A.V. Melendres, H. Honda, N. Shiragami, H. Unno: *J. Chem. Eng. Jap.* 26 (2), 148 (1993).
5. A. Heim, U. Kamionowska, M. Solecki: *J. Food Eng.* 83, 121 (2007).
6. M. Solecki: 5th International Conference for Conveying and Handlings of Particulate Solids, Sorrento, Italy, 2006.
7. M. Solecki: XI Ogólnopolskie Seminarium na temat Mieszanie, Łódź – Rogów (2008).
8. A. Heim, M. Solecki: *Powder Technology* 105, 390 (1999).

Praca wykonana w ramach projektu badawczego W-10/1/2009/Dz.St.