

- [11] Koźlak W.: Badania turbidymetryczne układów: szkło wodne sodowe – wybrane sole żelaza. *Chemik* 2006; 49(6): 337-340.
- [12] Koźlak W., Pysiak J., Pysiak W.: Krzemian sodowy w antykorozyjnej ochronie stali używanych w przemysłowych instalacjach wód obiegowych i komunalnych. *Ochrona przed korozją* 1989; 32(11-12): 255-257.
- [13] Koźlak W.: The turbidymetric studies on the sodium water glass-selected iron salt systems. *Annals Pol. Chem. Soc.* 2004; 3: 252-256.
- [14] Koźlak W., Pysiak J.: Wpływ niektórych fosforanów na fizykochemiczne właściwości szkieł wodnych sodowych w technologii mas formierskich. Materiały Sympozjum pt. „Fizykochemiczne metody wytwarzania form i rdzeni, a aktualna sytuacja w odlewnictwie krajowym”, Kraków 1983.
- [15] Koźlak W.: Szkła wodne sodowe, Część. I. Otrzymywanie i zastosowanie. *Wiad. Chem.* 2005; 59(9-10): 791-806.
- [16] Koźlak W.: Szkła wodne sodowe. Część II. Właściwości i skład molekularny roztworów wodnych. *Wiad. Chem.*; 2006, 60(5-6): 379-395.
- [17] Augustyn W., Grobelny N.: Krzemian sodu niedoceniony w kraju produkt przemysłu chemicznego. *Chemik* 1957; 10: 262-268.
- [18] Koźlak W.: Badania składu molekularnego stężonych (fabrycznych) sodowych szkieł wodnych. *Przem. Chem.* 1992; 71(7): 279-283.
- [19] Sienko J.M., Plane R.A.: Chemia. Podstawy i zastosowanie. WNT, Warszawa 1992.
- [20] Lee J.D.: Związki chemia nieorganiczna. PWN, Warszawa 1994.
- [21] Bielański A.: Chemia ogólna i nieorganiczna. PWN, Warszawa 1976.
- [22] Pauling L., Pauling P.: Chemia. PWN, Warszawa 1983.
- [23] Skinder N.W.: Chemia a ochrona środowiska. WSiP, Warszawa 1995.
- [24] Bezak-Mazur E.: Elementy toksykologii środowiskowej. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2001.
- [25] Alloway B.J., Ayres D.C.: Chemiczne podstawy zanieczyszczenia środowiska. PWN, Warszawa 1999.
- [26] Zakrzewski S.F.: Podstawy toksykologii środowiska. PWN, Warszawa 1995.
- [27] Kabata-Pendias A., Pendias H.: Pierwiastki śladowe w środowisku biologicznym. Wyd. Geolog., Warszawa 1979.
- [28] Gruca-Królikowska S., Waclawek W.: Metale w środowisku, Cz. II. Wpływ metali ciężkich na rośliny. *Chemia. Dydaktyka. Ekologia. Metrologia* 2006; R. 11(1-2): 41-54.
- [29] Hermanowicz W., Dożańska W., Dojlido J., Kozirowski B.: Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków. Arkady, Warszawa 1976.
- [30] Harper H.A., Rodwel V.W., Mayes P.A.: Zarys chemii fizjologicznej. PZWL, Warszawa 1983.
- [31] Dutkiewicz T.: Chemia toksykologiczna. PZWL, Warszawa 1974.
- [32] Stasiak J., Stasiak K.: Problemy środowiska przyrodniczego. PWN, Warszawa 1983.
- [33] Koźlak W.: An attempt to evaluate the interactions between sodium silicates of different silicate moduli and selected salts of transition metals. *Pol. J. Appl. Chem.*, w druku.
- [34] Danzer K., Than E., Molch D.: Analityka – ustalanie składu substancji. PWN, Warszawa 1980.
- [35] Krasodomski W., Krasodomski M., Siwiec D.: Badanie wpływu struktury dodatków na proces demulgowania w układach paliwo-woda, *Biuletyn ITN* 2006; kwiecień-czerwiec: 83-96.

GRZEGORZ PASTERNAK

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Politechnika Wrocławska

## Bioreaktory oraz ich zastosowanie w inżynierii i ochronie środowiska

*Bioreactors and their application in environmental protection and engineering*

### Streszczenie:

*Na przestrzeni wieków bioreaktory zmieniały swój kształt oraz znajdowano dla nich kolejne zastosowania. Najpopularniejsze i zarazem najstarsze obejmowały technologię żywności. Dziś bioreaktory są powszechnie wykorzystywane w celu poprawy jakości środowiska naturalnego. Biologiczny etap oczyszczania ścieków jest sercem każdej nowoczesnej oczyszczalni ścieków bytowo-gospodarczych. Bioreaktory wykorzystuje się również w celu produkcji biogazu, bioremediacji gruntów oraz oczyszczania gazów przemysłowych.*

*W niniejszym artykule omówiono podstawowe typy bioreaktorów oraz przykłady ich wykorzystania w szeroko pojętej inżynierii środowiska. Nieustający rozwój nauk technicznych i podstawowych prowadzi do powstawania kolejnych pomysłów na wykorzystanie czynników biologicznych w celu neutralizacji ryzyka związanego z działalnością antropogeniczną. Przed inżynierią bioreaktorów stoją nowe wyzwania i zarazem olbrzymi potencjał rozwoju.*

### Abstract:

*In past centuries bioreactors were changing their shape and their applications were developing. The most common and the oldest applications contained food technology. Today, bioreactors are commonly used for increasing the quality of environment. Biological part of treatment is the heart of each domestic wastewater treatment plant. Bioreactors are also used for biogas production, bioremediation techniques or exhaust purification. In this paper we would like to present the idea of bioreactor methods and selected examples of their application in environmental protection. The ceaseless development of basic and technical science is creating innovative ideas for application of bioreactors for changing the quality of environment. New challenges and great potential is still waiting to be proved in research institutions.*

**Słowa kluczowe:** bioraktor, fermenter, SBR, fotobioreaktor, złoża biologiczne, bioreaktor z podnośnikiem powietrznym

**Keywords:** bioreactor, fermenter, SBR, photobioreactor, airlift bioreactor, trickling filter

## Podstawowe typy bioreaktorów

Historia bioreaktorów sięga równie daleko jak historia fermentacji. Fermentacja była przedmiotem naukowej debaty już w XIX wieku, jednak proces ten poznano dokładniej dopiero w 1930 r. Obecnie bioreaktory stosowane są w technologii żywności, hodowli żywych układów dla potrzeb medycyny, produkcji farmaceutyków czy wreszcie w inżynierii środowiska. Aby lepiej zrozumieć współczesne przykłady zastosowań bioreaktorów należy najpierw omówić ich podstawowe typy.

Bioreaktorem nazywamy urządzenie, które służy do przeprowadzania procesów biochemicznych w warunkach kontrolowanych [1]. W gruncie rzeczy definicję tę rozszerzyć można nie tylko na urządzenia, ale także na każdy system, w którym do czynienia mamy z reakcjami biochemicznymi, rozpatrując go jako całość lub dzieląc na elementy składowe. I tak komora osadu czynnego (KOCZ) jest bioreaktorem, pojedynczy kłaczek osadu czynnego, komórka bakteryjna, a w niej – organella komórkowe. Śledząc niektóre procesy zachodzące na poziomie molekularnym, po kolejnych etapach doświadczeń dojść można do takiej kontroli procesu, aby przyniósł on nam pożądany efekt w skali przemysłowej – np. pozyskania produktu przemiany materii danego organizmu lub ich grupy.

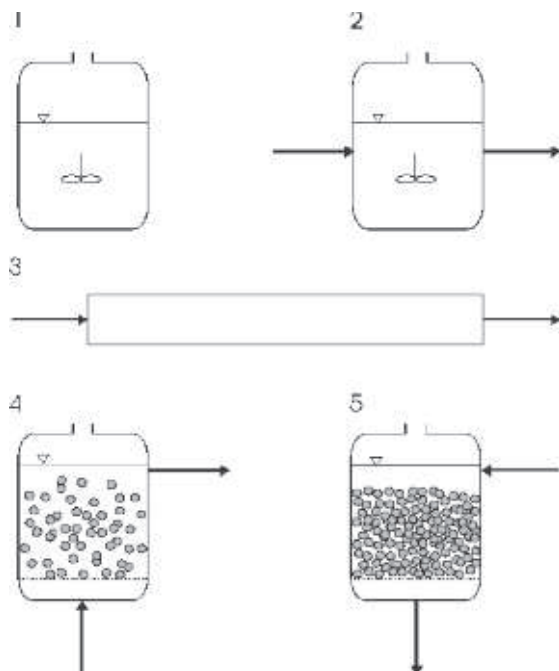
Bioreaktory odpowiadają tym samym prawom co reaktory chemiczne. Różnica polega jednak na złożoności systemu jakim jest żywy organizm. Reakcje biologiczne są bardziej wrażliwe i mniej stabilne, zatem wymagają większej dbałości o kontrolę procesu oraz analizy większej ilości czynników niż w przypadku reakcji chemicznych [2].

Istnieje wiele podziałów bioreaktorów. Podstawowy podział reaktorów [3] przedstawiono na rysunku 1, obejmuje on następujące typy:

– reaktor wsadowy (porcjowy) o idealnym wymieszaniu – reaktor ten, którego wielkości mogą się wahać od litrów do metrów sześciennych, wyposażony jest w system mieszania, którego zadaniem jest utrzymanie tego samego stężenia danego czynnika w całej objętości reaktora. Cykl pracy takiego urządzenia to dopływ – reakcja – odpływ. W przypadku reaktorów biologicznych reaktor taki charakteryzuje się względnie niskim ryzykiem zanieczyszczenia, mutacji, niskimi kosztami inwestycyjnymi w porównaniu do reaktorów przepływowych o tej samej objętości oraz zwiększoną kontrolą fazy wzrostu mikroorganizmów. Praca w cyklach obniża jednak efektywność procesu ze względu na czas potrzebny na poszczególne etapy, takie jak napełnianie, czyszczenie czy sterylizowanie. Niestacjonarny charakter przemian utrudnia również automatyzację całego systemu;

- reaktor przepływowy o idealnym wymieszaniu – reaktor również wyposażony jest w mieszadło utrzymujące równomierny rozkład stężenia w objętości komory reaktora. Do komory dopływa jednocześnie taka sama ilość medium jaka z niego odpływa, objętość utrzymywana jest więc na tym samym poziomie. Urządzenie takie w mikrobiologii nazywamy chemostatem. Jego użytkowanie wiąże się z większymi kosztami inwestycyjnymi, które rekompensowane są jednak możliwością automatyzacji wielu procesów i brakiem bezproduktywnych etapów jak w reaktorze wsadowym. Niewątpliwą wadą tego typu urządzeń jest jednak zwiększone ryzyko zanieczyszczenia medium ze względu na drogą i trudną sterylizację w warunkach przepływu;
- reaktor o przepływie tłokowym – ten typ reaktora również może być wyposażony w systemy mieszające, ich zadaniem nie jest jednak utrzymanie jednolitego stężenia w reaktorze, a zapobiega sedymentacji i umożliwia kontakt składników mieszaniny reakcyjnej. Podzielony umownie na nieskończenie wiele elementów może być opisywany jako kaskada reaktorów o pełnym wymieszaniu. Zaletą takiego systemu jest zwiększona efektywność reakcji związana z kinetyką reakcji biochemicznych. Ta sama objętość reaktora tłokowego w porównaniu do reaktora przepływowego o pełnym wymieszaniu daje lepszy efekt w związku z wyższym stężeniem przy wejściu do reaktora tłokowego. Wpływa ono na szybkość reakcji – w reaktorze przepływowym stężenie jest natychmiast uśredniane;
- reaktor ze złożem fluidalnym – reaktor wypełniony jest złożem, które unoszone jest za pomocą pompowanego gazu lub wraz z przepływem medium reakcyjnego. Gaz i medium przepływać mogą przeciwprądowo lub współprądowo. Na złożu immobilizowane mogą być enzymy czy mikroorganizmy. Zaletami tego typu rozwiązania są: jednolity rozkład temperatury dzięki możliwości ciągłego mieszania złoża i medium oraz możliwość prowadzenia procesu w sposób ciągły. Niewątpliwą wadą są duże koszty eksploatacyjne i inwestycyjne związane z pompowaniem powietrza, medium, zwiększonym ryzykiem mechanicznego uszkodzenia płaszcza (a więc i droższym materiałem do jego wykonania), koniecznością zwiększenia objętości oraz separacji wyłukiwanego złoża;
- reaktor z wypełnieniem – zasada działania tego typu reaktora jest zbliżona do reaktora fluidalnego, z tym że wypełnienie osadzone jest na ruszcie lub stanowi element konstrukcyjny. Stosowane są tutaj różne wypełnienia charakteryzujące się zróżnicowaną powierzchnią kontaktu oraz oporami przepływu. W przypadku bioreaktorów do czynienia mamy tutaj ze złożami zraszanymi, medium spływa grawitacyjnie. Wzrost ciśnienia mógłby uszkodzić wrażliwy materiał biologiczny, a prędkości – spadkiem skuteczności.

✉ Grzegorz Pasternak, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Politechnika Wrocławska, ul. Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel. (71) 3202532, e-mail: grzegorz.pasternak@pwr.wroc.pl



Rys. 1. Podstawowe typy reaktorów: 1 – reaktor wsadowy o pełnym wymieszaniu, 2 – reaktor przepływowo o pełnym wymieszaniu, 3 – reaktor o przepływie tłokowym, 4 – reaktor fluidalny, 5 – reaktor z wypełnieniem

Fig. 1. Basic types of bioreactors: 1 – batch reactor, 2 – continuously stirred reactor, 3 – flow bioreactor, 4 – fluidized-bed reactor, 5 – fixed bed reactors

## Kontrola procesu

Pomiędzy poszczególnymi składnikami mieszaniny reakcyjnej, takimi jak organizmy, komórki tkanek, mikroorganizmy, produkty ich metabolizmu, składniki podłoża, czy nośnikami zachodzi szereg reakcji. Biorąc pod uwagę wszystkie przemiany termodynamiczne, bioreaktor tworzy skomplikowany system, którego kontrola wymaga stałego monitorowania wielu parametrów, takich jak: strumień objętości, temperatura, pH, natlenienie, szybkość mieszania, obecność piany, obecność substratów, podaż mikro- i makroelementów, koenzymów oraz usuwanie produktów ubocznych i końcowych procesu.

Do kontroli natężenia przepływu stosowane są pompy i zawory. Bioreaktory wyposażone są zwykle w płaszcze, za pomocą których utrzymywana jest odpowiednia temperatura. Mogą to być płaszcze elektryczne lub wodne, umożliwiające również chłodzenie reaktora. Odczyn regulowany jest poprzez dozowanie odpowiednich ilości kwasów i zasad. Istnieje szereg sposobów mieszania, w zależności od doboru mieszadła (mechaniczne, pneumatyczne, hydrauliczne) uzyskuje się również inne natlenienie podłoża. Powstająca w procesach mikrobiologicznych piana może być usuwana tzw. zbijaczami piany – umieszczane nad roztworem, obrotowe elementy, które rozbijają pianę. Innym, rzadko stosowanym rozwiązaniem jest jej kierowanie do

cyklonów oraz zawracanie powstającej w nich cieczy do układu.

## Wybrane przykłady bioreaktorów

Na podstawie omówionych podstawowych typów reaktorów konstruowane są ich kompilacje w mniejszym lub większym stopniu odpowiadające typowi któregoś z nich. Najlepiej poznanymi reaktorami w inżynierii środowiska są niewątpliwie urządzenia stosowane w technologii wody i ścieków. Stosuje się tu niemal wszystkie rodzaje reaktorów. Jako przykład służyć może reaktor typu SBR (Sequencing Batch Reactor). Reaktor ten jest reaktorem wsadowym o cyklicznym trybie pracy. Pracować on może zarówno w warunkach aerobowych jak i anaerobowych lub anoksydacyjnych (przy odpowiednio dużej objętości komory – reaktory pracują przy ciśnieniu atmosferycznym). Cykl pracy takiego urządzenia (rys. 2) składa się z następujących kolejno etapów:

- napełnianie reaktora – ścieki powoli wypełniają komorę reaktora, mieszanie odbywa się przy małej prędkości turbiny, napowietrzanie jest wyłączone;
- faza reakcji podczas napełniania – ścieki są mieszane i napowietrzane, następuje rozkład materii organicznej oraz nityfikacja, w tej fazie napowietrzanie może być wyłączone w celu podtrzymania warunków beztlenowych;
- faza reakcji (reaktor wypełniony);
- faza sedymentacji – mieszanie i/lub napowietrzanie zostają wyłączone, osad sedymentuje;
- faza dekantacji – sklarowane ścieki zostają odprowadzone z reaktora, osad natomiast kierowany jest do komory zagęszczania osadu.

Schemat działania reaktorów typu SBR przedstawiono na rysunku 3. Warto tutaj dodać, że ze względu na wspomniane wcześniej wady reaktorów wsadowych, reaktory tego typu buduje się zwykle w ilości co najmniej dwóch reaktorów, podczas gdy dopływ w jednym z nich jest zamknięty, ścieki kierowane są do drugiego.

Innym, powszechnym typem bioreaktora jest złożo biologiczne (rys. 3) – rodzaj bioreaktora, w którym ścieki przepływają grawitacyjnie przez złożo, na którym osadzone są mikroorganizmy. Jakkolwiek praca w takim złożu odbywa się w warunkach tlenowych, tak gradient tego stężenia jest nierównomierny i mogą pojawiać się strefy beztlenowe, zarówno w przekroju całego złoża jak i błony biologicznej (podobne zjawisko występuje w kłaczkach osadu czynnego). Tradycyjne złoża biologiczne dzielą się na zraszane i splukiwane w zależności od obciążenia hydraulicznego i obciążenia ładunkiem. Reaktory takie stosowane są głównie w małych oczyszczalniach ścieków.

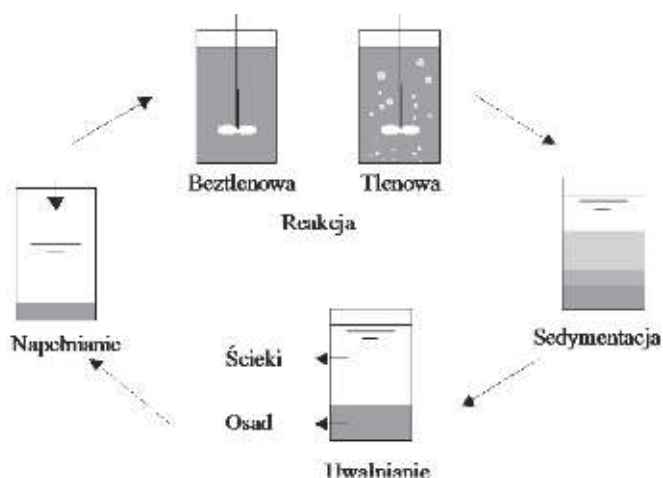
Często spotykanym rozwiązaniem w ostatnich czasach stosowanym w oczyszczaniu ścieków są również reaktory z tzw. podnośnikiem powietrznym (rys. 4). Mowa tutaj

o reaktorach, w których przepływ cieczy kontrolowany jest za pomocą tłoczonego do reaktora powietrza. Przykładem takiego rozwiązania jest reaktor, w którym powietrze tłoczone jest do umieszczonej centralnie rury. Poruszająca się ku górze ciecz zostaje napowietrzana, gaz ulatuje w górnej, otwartej części rury, natomiast ciecz przepływa do jej zewnętrznej części, gdzie odbierany jest produkt reakcji [4].

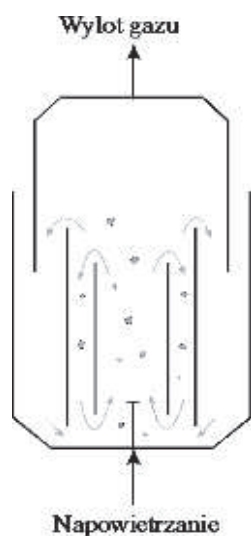
Reaktor taki stosowany może być – poza mikroorganizmami – również do hodowli komórek roślinnych i zwierzęcych. Jego zaletą jest prosta budowa, eliminacja mieszadła i innych ruchomych elementów tradycyjnych bioreaktorów, co ułatwia eksploatację i utrzymanie reaktora w czystości, co jest istotne, jeśli istotą procesu jest np. produkcja enzymów katalizujących rozkład związków organicznych. Przykładem wykorzystania takiego bioreaktora

w oczyszczaniu ścieków może być instalacja opisana przez Jin i wsp. [5]. Bioreaktory z podnośnikiem powietrznym wykorzystywane są w niej do oczyszczania wód podprocesowych zawierających skrobię. Biodegradację prowadzi się z wykorzystaniem grzyba *Aspergillus oryzae*. Osiągana skuteczność opisanego procesu wynosi 95% dla ChZT, 93% dla BZT oraz 98% dla zawieszin. Wykorzystanie bioreaktora z podnośnikiem powietrznym umożliwia tutaj utrzymanie kultury grzyba w formie granulek, które nie zwiększają lepkości roztworu w przeciwieństwie do grzybni.

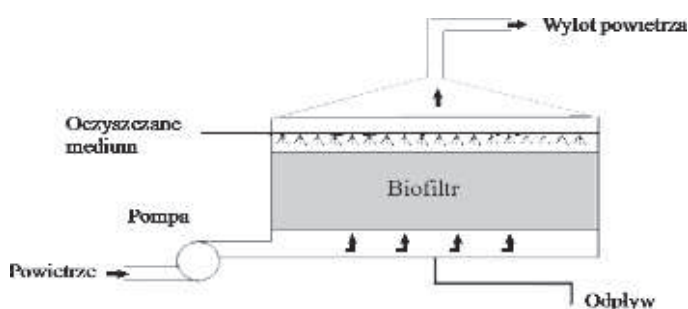
W niektórych bioreaktorach to nie czynniki chemiczne odgrywają główną rolę, a czynniki fizyczne. Przykładem takich bioreaktorów są fotobioreaktory – wykorzystujemy w nich organizmy fotoautotroficzne. Ich budowa może być



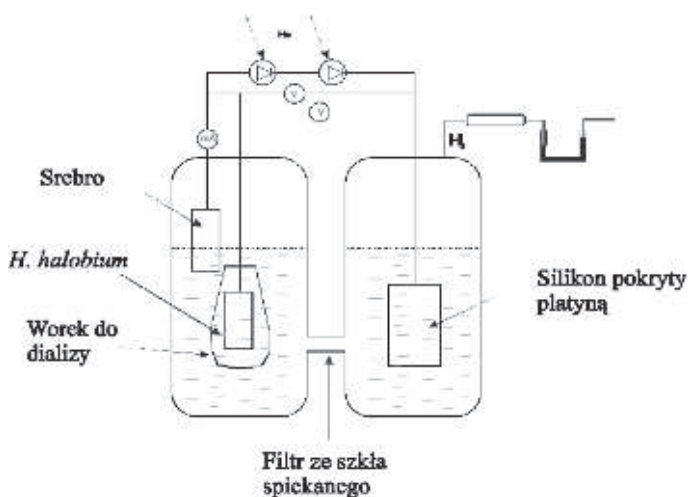
Rys. 2. Przebieg procesu w reaktorze typu SBR  
Fig. 2. SBR process scheme



Rys. 4. Bioreaktor z podnośnikiem powietrznym, na podstawie [6]  
Fig. 4. Airlift bioreactor, according to [6]



Rys. 3. Schemat działania biofiltru  
Fig. 3. Biofilter scheme



Rys. 5. Reaktor biofotoelektrochemiczny, zastosowanie elektrody umożliwia formowanie gazu z wodoru powstającego w wyniku działania pompy protonowej *Halobacterium halobium*, na podstawie [7]  
Fig. 5. Biofotoelectrochemical reactor, application of electrodes leads to hydrogen formation. Hydrogen is produced by *Halobacterium halobium* proton pump. According to [7]

różna – od prostych konstrukcji z wąskimi komorami po wielkopowierzchniowe systemy. Najistotniejszym czynnikiem limitującym projekt takiego reaktora jest ograniczona penetracja promieniowania, zmienna w czasie ze względu na zmiany gęstości hodowli w bioreaktorze. Hodowla glonów w takich bioreaktorach może mieć na celu pozyskanie biomasy wykorzystywanej w celach energetycznych, produktów przemiany materii organizmów fotosyntetyzujących, czy produkcji wodoru cząsteczkowego. Uzyskiwany on może być w wyniku działania enzymu odwracalnej hydrogenazy w warunkach braku siarki lub w sprzężeniu z procesami elektrochemicznymi. Reaktor przedstawiony na rysunku 5 składa się z dwóch komór wypełnionych NaCl i oddzielonych filtrem ze szkła spiekane. Szczep *Halobacterium halobium* umieszczony jest w jednej z komór zawierających elektrody srebrną oraz platynową. W drugiej komorze znajduje się silikonowa elektroda pokryta platyną. Naświetlanie systemu prowadzi do produkcji protonów przez bakterie oraz elektronów, w wyniku czego dochodzi do uwolnienia wodoru.

### Kierunki rozwoju bioreaktorów

Wspólną cechą wymienionych przykładów bioreaktorów jest wykorzystywanie do procesu biomasy w postaci całych komórek. Współczesne badania nad bioreaktorami podążają w kierunku wykorzystywania czystych enzymów w reakcjach biochemicznych. Takie rozwiązanie ma swoje uzasadnienie w zmniejszeniu ilości parametrów mających wpływ na kontrolę procesu. W celu minimalizacji kosztów związanych z koniecznością stosowania enzymu wykorzystuje się szereg nośników do immobilizacji cząsteczek, co umożliwi również ich separację z mieszaniny reakcyjnej. Enzymy w reaktorach enzymatycznych wiązane są kowalencyjnie na takich nośnikach jak szkło czy celuloza mikrokrystaliczna. W niektórych spośród spotykanych rozwiązań enzymy mogą być przyłączane bezpośrednio do ścian reaktora. Przykładem takiego reaktora jest kapilarny mikroreaktor opisany przez Jones i wsp. [8]. W reaktorze tym wykorzystano tę samą technologię, której używa się do tworzenia mikroukładów w elektronice. Enzym związany był ze ścianą pokrytą polidimetylsiloksanem, a uzyskiwane w eksperymentach szybkości konwersji mocznika do amoniaku były wyższe niż w rozwiązaniach stosowanych w reaktorach wsadowych. Ureaza – enzym katalizujący rozkład mocznika jest modelowym przykładem enzymu, na którym wykonuje się badania nad reaktorami enzymatycznymi. Wadą przytoczonego reaktora jest niski ładunek mocznika poddawanego konwersji. Pamiętać jednak należy, że jest to etap badań laboratoryjnych, który ilustruje wykorzystanie niekonwencjonalnych technologii w procesach o podłożu biologicznym.

Również w przypadku reaktorów enzymatycznych zachodzi konieczność opracowania optymalnych warunków ich pracy. Monitorowanie zmian zachodzących w bioreakto-

rach jest istotne w aspekcie efektywności prowadzonego procesu. Określenie optymalnej temperatury, pH czy szybkości przenikania masy jest punktem wyjściowym do opracowania strategii procesu. Dobra znajomość procesów biochemicznych umożliwi zaprojektowanie reaktora przeprowadzającego serię reakcji enzymatycznych w odpowiedniej kolejności. Bardzo istotne jest zatem opracowanie odpowiednich systemów monitoringu oraz modelowania procesów zachodzących w bioreaktorach. Modelowanie *in silico* pozwala na przeprojektowanie bioreaktora na podstawie danych pochodzących z małego obiektu testowego. Niemniej jednak nieumiejętne stosowanie modeli lub przyjmowanie błędnych założeń prowadzić może do zanieczyszczenia środowiska, zwłaszcza w reaktorach wykorzystujących bardziej zaawansowane reakcje enzymatyczne [9]. Dopracowanie komputerowego wspomaganie projektowania reaktorów enzymatycznych umożliwić może uzyskiwanie wielu cennych produktów z wód czy ścieków.

Najważniejszą przeszkodą w rozwoju nowych technologii wykorzystujących bioreaktory jest zatem problem transferu procesu o charakterze eksperymentalnym do skali przemysłowej. Bioreaktory zajmują i będą zajmować bardzo istotne miejsce w naukach związanych z ochroną środowiska, dlatego przeniesienie wiedzy naukowej do poziomu technicznego wydaje się być niezbędne w celu poprawy jakości środowiska naturalnego.

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



KAPITAŁ LUDZKI  
realizacja przez Europejski Fundusz Społeczny



### LITERATURA

- [1] McNaught A.D., Wilkinson A.: Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). UPAC, Blackwell Scientific Publications, Oxford 1997.
- [2] Kleinstreuer C., Poweigha T.: Modeling and Simulation of Bioreactor Process Dynamics. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 1984; Vol. 30: 91-143.
- [3] Williams J.A.: Keys to bioreactor selections, CEP, march 2002: 34-41.
- [4] Merchuk J.C.: Airlift Bioreactors: Review of Recent Advances. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2003; Vol. 81: 324-337.
- [5] Jin B., Yan X.Q., Yu Q., van Leeuwen J.H.: Comprehensive Pilot Plant System for Fungal Biomass Protein Production and Wastewater Reclamation. *Advances Environmental. Research* 2002; Vol. 6: 179-189.
- [6] van Benthum W.A.J., van der Lans R.G.J.M., van Loosdrecht M.C.M., Heijnen J.J.: Bubble Recirculation Regimes in an Internal-Loop Airlift Reactor. *Chemical Engineering Science* 1999; Vol. 54: 3995-4006.
- [7] Turlck C.E., McIlwain M.E.: Review of nonconventional bioreactor technology, U.S. Department of energy, September 1993, Contract DE-AC07-76ID01570.
- [8] Jones F., Lu H., Elmore B.B.: Development of Novel Microscale System as Immobilized Enzyme Bioreactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2002; Vol. 98-100: 627-640.
- [9] Wiseman A.: Replacement of immobilised cell bioreactors by smaller immobilized enzyme bioreactors: unique-outcome predictability for cytochromes P450 isoforms? *Biotechnology Letters* 2003; Vol. 25: 1581-1590.