

Przegląd fotobioreaktorów do produkcji biodiesla

Agnieszka PATYNA*, Stanisław WITCZAK – Katedra Inżynierii Procesowej, Politechnika Opolska, Opole

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2016, 70, 10, 634–643

Wstęp

Mikroalgi są najdłużej żyjącą na świecie autotroficzną jednostką taksonomiczną [1]. Algi, to organizmy beztkankowe, są jednokomórkowcami bądź prostymi wielokomórkowcami. Wśród nich znajdują się zarówno prokariotyczne mikroalgi (cyjanobakterie, zwane inaczej niebiesko-zielonymi algami), jak również eukarioty, np. algi zielone (*Chloroxybacteria*), algi czerwone (*Rhodophyta*) oraz okrzemki (*Bacillariophyta*). Algi mogą rozmnażać się płciowo lub bezpłciowo [2÷4]. Syntetyzują trzy główne związki biochemiczne, a mianowicie: węglowodany, białka i lipidy (naturalne oleje). Dzięki ich wysokiemu współczynnikowi wzrostu, powszechnie są znane z syntetyzowania i akumulacji zdecydowanie większych ilości lipidów niż rośliny lądowe [1]. Uważane są za najbardziej odporne organizmy na Ziemi, zdolne do wzrostu w różnych warunkach. Można je znaleźć w wilgotnych miejscach oraz na powierzchniach wód. Zamieszkują zarówno wody słodkie jak i ekstremalnie zasolone oraz praktycznie każde środowisko z wystarczającym dostępem do światła. Są również szeroko rozpowszechnione na lądzie. Z roślinami wyższymi łączy je tylko obecność chlorofilu i zdolność do przeprowadzania procesu fotosyntezy.

Wykorzystanie alg

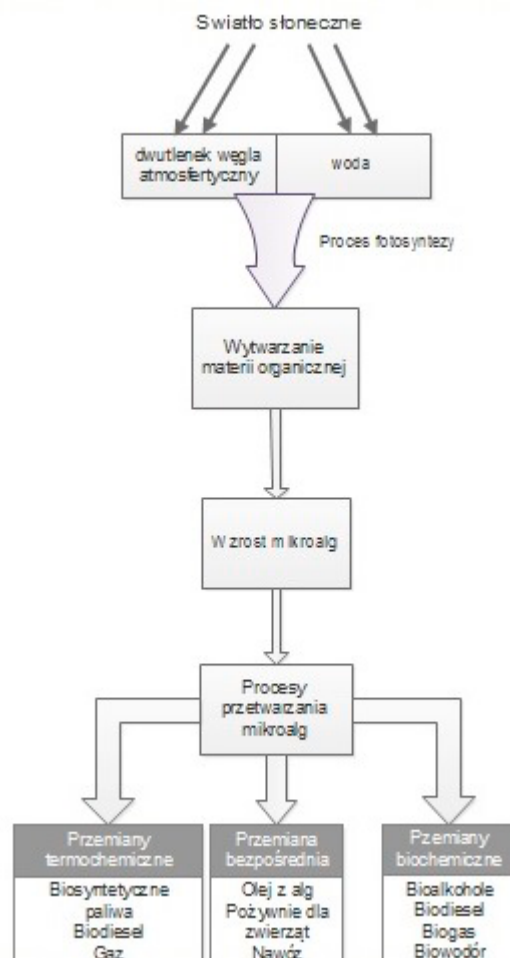
Algi znalazły zastosowanie w produkcji farmaceutyków (antybiotyki, witaminy, żywność funkcjonalna, algicydy), barwników, białek oraz jako czynnik oczyszczający wodę [5÷8]. Rysunek 1 obrazuje proces hodowli alg rozpoczynający się od pobierania energii świetlnej i wiązania CO₂, a kończący praktycznym przeznaczeniem produktów powstałych z biomasy [9].

Algi w produkcji biodiesla

Porównując algi do surowców pierwszej i drugiej generacji, mogą one wyprodukować więcej energii w przeliczeniu na hektar [10]. Technologia produkcji biodiesla jest znana od 50. lat [11]. Z 1 ha można uzyskać od 10 do nawet 100 razy więcej oleju niż w przypadku upraw roślin olejnych. Dodatkowo, cykle życiowe roślin trwają od 3 miesięcy do 3 lat, a algi mogą zacząć produkować olej już po 3–5 dniach hodowli, co umożliwi codzienne zbieranie plonu. Algi mogą rosnąć w słonej wodzie lub na nieużytkach zawierających wodę niezdatną do picia, gdzie niczego innego praktycznie nie można hodować [9]. Duże ilości lipidów, białek i węglowodanów są produkowane w krótkim czasie tylko dzięki dostępowi do światła, cukrów, CO₂, N, P i K. Wymienione produkty można przetwarzać na biopaliwa, bądź inne użyteczne związki chemiczne [9, 12]. Dużą zaletą, pozwalającą uważać algi za surowiec do produkcji biodiesla, jest szybki wzrost i wysoka zawartość oleju w komórkach (stanowiąca 20–77% suchej masy) [11]. Dodatkowo algi potrzebują do wzrostu mniejszych od roślin lądowych ilości wody [13]. Wg danych literaturowych, 1 kg suchej masy alg utylizuje ok. 1,83 kg CO₂, można więc śmiało stwierdzić, że algi pozwalają usuwać CO₂ z atmosfery, a tym samym mogą być wykorzystane do poprawy jakości powietrza [11]. Kolejną zaletą dla środowiska jest także to, że algi podczas procesu hodowli nie wymagają stosowania żadnych herbicydów, ani pestycydów. Białka i pozostałości biomasy po ekstrakcji oleju mogą być

wykorzystane jako nawóz lub poddane fermentacji do wytworzenia bioetanolu lub bioetanu. Odpowiedni skład biomasy alg można także zmieniać stosując różne warunki hodowli [13].

Zasadnicza produkcja biodiesla z alg składa się z trzech etapów: hodowli komórek, oddzielenia ich od medium hodowlanego i ekstrakcji lipidów [7]. Zawartość oleju w komórkach alg zależy od ich gatunku. Spośród ponad 50 000 żyjących gatunków alg, nie wszystkie są odpowiednie do produkcji biodiesla. Decydują o tym głównie procesy fizjologiczne oraz warunki hodowli [14]. Najbardziej obiecującymi grupami alg w produkcji biodiesla są algi zielone, okrzemki oraz cyjanobakterie [15].



Rys. 1. Proces hodowlany alg

Produkcja biomasy – warunki hodowli alg

Przy rozważaniach nad użyciem alg do produkcji biodiesla, bardzo ważne jest, by zdefiniować wpływ parametrów hodowlanych oraz możliwość operowania nimi w celu jak największego uzysku biomasy. To jedyny sposób, by całkowicie kontrolować populację mikroalg, nawet przy hodowli na dużą skalę. Na wzrost alg wpływ mają zarówno czynniki abiotyczne, biotyczne jak i czynniki procesowe. Do czynników abiotycznych zalicza się światło (znaczenie mają tu zarówno czas jak i natężenie naświetlania), temperaturę, stężenie substancji odżywczych, O₂, CO₂, pH, zasolenie oraz obecność toksycznych che-

*Autor do korespondencji:

Mgr inż. Agnieszka PATYNA, e-mail: patyna.a@gmail.com

mikaliów. Czynniki biotyczne, to głównie obecność patogenów (bakterii, grzybów, wirusów) oraz oddziaływanie z innymi gatunkami alg. Do czynników procesowych należy z kolei zaliczyć mieszanie, stężenie biomasy, głębokość oraz częstość zbierania alg.

Medium hodowlane powinno zawierać związki nieorganiczne, które wchodzi w skład komórek glonów. Najważniejszymi w tym zakresie pierwiastkami jest azot (N), fosfor (P), żelazo (Fe), a w niektórych przypadkach także krzem (Si). Oprócz tych składników powinno się również dostarczać magnez (Mg), wapń (Ca) i siarkę (S). Najczęściej do hodowli alg słonowodnych wykorzystuje się wodę morską wzbogaconą w komercyjne nawozy azotowe i fosforowe oraz kilka wybranych mikroelementów [11]. Ważnym składnikiem każdej pożywki jest woda, którą organizmy fotosyntetyzujące potrzebują do produkcji biomasy. To czynnik, którego nie można niczym innym zastąpić. Media hodowlane generalnie nie stanowią dużych kosztów. Dobierając odpowiednią pożywkę trzeba odpowiedzieć na pytanie, jakie ilości substancji odżywczych będą wystarczające do przeprowadzenia procesu, tak by nie ponosić dodatkowych kosztów związanych ze stratami niewykorzystanej pożywki. W systemach zamkniętych związki odżywcze dodaje się po wyczerpaniu poprzednich.

Biomasa mikroalg w prawie 50% suchej masy składa się z węgla [16]. Zazwyczaj cały węgiel dostarczany jest w postaci dwutlenku węgla. Wyprodukowanie 100 t biomasy alg powoduje zużycie ok. 183 t CO₂. Dostarczanie dwutlenku węgla powinno odbywać się w sposób ciągły podczas oświetlania hodowli. Polecane jest kontrolowanie dostarczania dwutlenku węgla za pomocą czujników pH, co zminimalizuje straty CO₂ oraz wahania odczynu pH [11].

Średnia ilość promieniowania słonecznego, które dociera na naszą planetę w każdej sekundzie wynosi ok. 1367 W/m², jest to tzw. stała słoneczna [17]. Właściwa ilość promieniowania zależy od szerokości geograficznej, sezonu i pogody. Produkcja biomasy w dużej skali polega zasadniczo na prowadzeniu hodowli ciągłej oświetlanej światłem słonecznym.

Temperatura jest – zaraz po warunkach świetlenia – najbardziej ograniczającym czynnikiem wpływającym na kulturę alg, zarówno w systemach zamkniętych jak i otwartych. Wpływ temperatury w warunkach laboratoryjnych dla wielu gatunków alg został dość dobrze opisany. Wiele gatunków łatwo toleruje temperatury o 15°C niższe od ich optimum, ale zwiększenie już o 2–4°C powoduje straty w hodowli. W upalne dni, w zamkniętych fotobioreaktorach, temperatura może dochodzić nawet do 55°C, dlatego należy stosować w nich odpowiednie systemy chłodzące [7].

Każdy gatunek glonów ma również swoje własne optimum zasolenia. Najprostszym sposobem kontrolowania zasolenia jest dodawanie słodkiej wody albo wymaganej ilości soli [7].

Mieszanie to kolejny ważny czynnik, który odpowiada za równomierne rozprowadzanie komórek glonów, ciepła, metabolitów oraz ułatwia transfer gazów. Mieszanie jest zalecane również dla przemieszczania komórek ze stref ciemnych do jasnych, szczególnie w instalacjach do produkcji alg na dużą skalę [7]. Z drugiej strony, duża lepkość płynu i intensywne mieszanie (mechaniczne lub poprzez napowietrzanie) może uszkodzić komórki [18]. Optymalna intensywność mieszania zależy od szczepu i powinna być tak dobrana, by uniknąć strat hodowlanych [19].

Należy jeszcze wspomnieć o możliwych zanieczyszczeniach; przyczyną zanieczyszczeń biologicznych mogą być niepożądane gatunki alg, próchnica, drożdże, grzyby i bakterie. Jest to jednak problem częściej występujący w otwartych systemach hodowlanych niż w fotobioreaktorach.

Systemy produkcji glonów

Hodowlę alg można prowadzić w systemach otwartych (stawach hodowlanych) oraz w kontrolowanych systemach zamkniętych, nazwanych fotobioreaktorami. Fotobioreaktory (PBR), to systemy, w któ-

rych kultura hodowlana jest ograniczona przezroczystym materiałem. Urządzenia te mogą mieć różne rozmiary i kształty; mogą przybierać formę plastikowych toreb, płaskich paneli, rur lub fermentatorów. Najbardziej popularne są pionowe rury; są względnie proste w utrzymaniu, tanie oraz mają dużą powierzchnię w stosunku do objętości [20]. Największymi zaletami fotobioreaktorów jest odporność na zanieczyszczenia, osiąganie wysokiej produktywności na jednostkę powierzchni oraz możliwość łatwej kontroli parametrów hodowlanych (pH, temperatury, intensywności światła). Można w nich również zapobiegać zbyt intensywnemu namnażaniu komórek alg; pozwalają na oszczędzanie wody i środków chemicznych [21]. Fotobioreaktory mogą znajdować się wewnątrz lub na zewnątrz budynków, do ich oświetlenia używa się światła słonecznego lub sztucznego, ewentualnie tych dwóch opcji jednocześnie. Interesującym zagadnieniem jest także użycie włókien optycznych do przesyłania światła słonecznego z zewnątrz do wnętrza kultur hodowlanych znajdujących się w budynkach [22], co pozwala na zmniejszenie nakładu energetycznego [1]. Źródłem sztucznego światła może być zarówno oświetlenie wolframowe, jak i fluorescencyjne. Należy zaznaczyć również, że coraz częściej do hodowli alg używa się również światła LED (diod emitujących światło) z uwagi na to, że podczas pracy generują one małe ilości ciepła, są energooszczędne oraz mogą emitować fale świetlne bliskie PAR (promieniowaniu czynnemu fotosyntetycznie). Obecne badania wskazują, że długość fali światła ma ogromny wpływ nie tylko na produkcję biomasy oraz lipidów, ale również na sam ich skład [23, 24].

Przy projektowaniu fotobioreaktorów powinno się rozważyć następujące zagadnienia [2]:

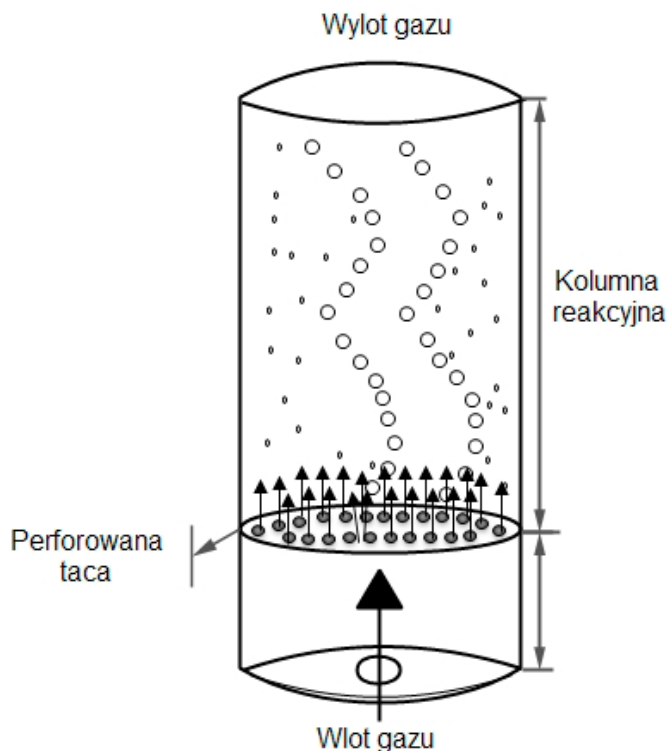
- reaktor powinien pozwalać na hodowlę różnych gatunków alg
- projekt musi przewidywać jednolite oświetlenie na całej powierzchni hodowli oraz szybki transfer CO₂ i O₂
- reaktor musi być często czyszczony oraz poddawany sterylizacji
- fotobioreaktor musi pracować w taki sposób, by nie dopuścić do powstania piany.

Fotobioreaktor kolumnowy

Jest wykonany z transparentnych (szkło, plastik) pionowych rur, tak aby światło mogło swobodnie przenikać przez jego ściany. Konieczne jest zamontowanie w nim urządzenia napowietrzającego, które sprawia, że wpadający gaz przybiera formę niewielkich pęcherzyków. Napowietrzanie mieszaną gazów zapewnia mieszanie, dostarczanie CO₂ oraz pozwala na usunięcie tlenu produkowanego podczas fotosyntezy [25]. Kolumny mają dużą powierzchnię naświetlania oraz są tanie. Można prowadzić w nich hodowlę na zewnątrz. W zależności od sposobu napowietrzania dzieli się na dwa opisane dalej typy. Wadą jest m.in. podatność na powstawanie biofilmu oraz niezbędna duża przestrzeń. Dodatkowo ograniczeniem jest zjawisko fotoinhibicji oraz trudność w kontrolowaniu temperatury hodowli [26] (można stosować termostaty, które są jednak trudne w użyciu i zwiększają koszty hodowli).

Kolumny barbotażowe

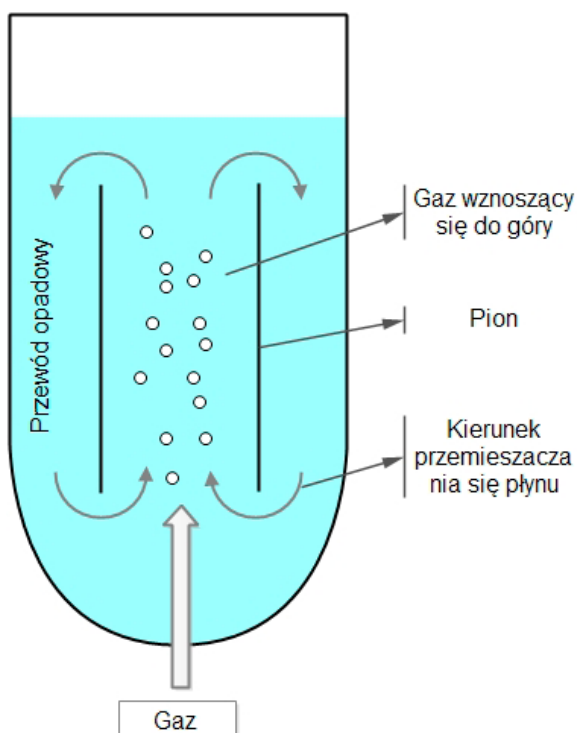
Są to cylindryczne naczynia o wysokości co najmniej 2-krotnie większej od średnicy. Ich zaletą jest niewielki koszt, duży stosunek powierzchni do objętości, brak elementów ruchomych, dość dobry transfer ciepła i masy, w miarę jednorodne środowisko hodowlane oraz wydajne uwalnianie O₂. Zarówno mieszanie, jak i rozprowadzanie CO₂, jest możliwe dzięki pęcherzykom gazu uwalnianym się z urządzenia napowietrzającego. Przy użyciu takiego systemu w dużej skali, szczególnie w odniesieniu do wysokich kolumn, używa się perforowanych tac, służących do rozdzielania połączonych pęcherzyków [2]. Kolumny oświetlane są tylko z zewnątrz. Wydajność fotosyntezy można zwiększyć intensyfikując przepływ gazu przeprowadzanego przez krótsze cykle jasne i ciemne. Rysunek 2 przedstawia schemat kolumny z napowietrzaniem barbotażowym.



Rys. 2. Kolumna barbotażowa [27]

Fotobioreaktory typu airlift

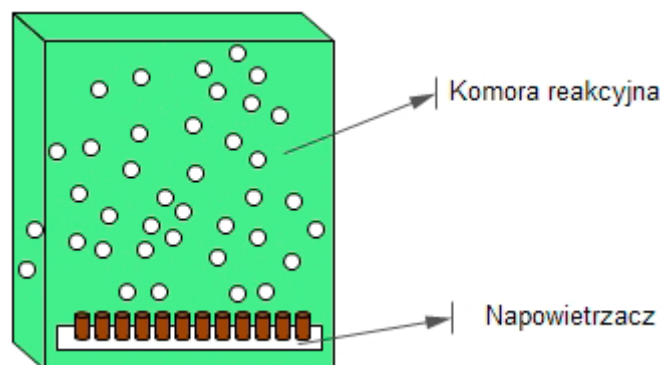
Tworzą je naczynia z dwiema połączonymi strefami. Pierwszą stanowi rura, zwana pionem, do której wprowadza się mieszaninę gazu. Drugą – przewód opadowy, do którego gaz nie jest doprowadzany. Mieszanie odbywa się w pionie poprzez przepływające pęcherzyki gazu (Rys. 3). Znane są też prostokątne fotobioreaktory typu airlift, które cechują się nawet lepszym mieszaniem i nadają wysoką wydajność fotosyntetyczną. Nie znalazły one jednak praktycznego zastosowania z uwagi na trudności w prowadzeniu hodowli w dużej skali [2]. Systemy barbotażowe i bioreaktory typu airlift nie są odpowiednie dla gatunków alg o niskim ciężarze właściwym, np. szczepy produkujące duże ilości lipidów, gdyż komórki tych alg mają tendencję do flotacji. Ponadto mieszanie zapewnione w tego typu fotobioreaktorach jest niewystarczające [28].



Rys. 3. Kolumna typu „airlift” [29]

Fotobioreaktor panelowy

Posiada sześciennie kształty z ograniczoną do minimum drogą światła. Fotobioreaktory panelowe zwykle są wykonane z przezroczystych materiałów, pozwalających na maksymalne wykorzystanie energii słonecznej, takich jak: szkło, pleksi, poliwęglany itp. Charakteryzują się dużym stosunkiem powierzchni do objętości. Mieszanie może się tu odbywać poprzez przepływające wzdłuż perforowanej rurki powietrze (korzystnie 1 litr powietrza na każdy litr objętości reaktora w czasie 1 minuty) lub obracając moduł mechanicznie [1, 30]. Naświetlanie dużej powierzchni pozwala na osiągnięcie wysokiej wydajności fotosyntezy [31]. Fotobioreaktor panelowy (Rys. 4) charakteryzuje się niskim wzrostem poziomu tlenu, jest też względnie tani i łatwy w czyszczeniu. Jednak produkcja na większą skalę wymaga użycia wielu modułów i konstrukcji podtrzymujących je. Należy także zaznaczyć, że w takich systemach trudno kontrolować temperaturę, a niektóre gatunki alg mogą tu być także narażone na stres hydrodynamiczny oraz tworzenie biofilmu. Fotobioreaktory panelowe są wykorzystywane do produkcji szczepów alg gromadzących lipidy w warunkach ograniczonego dostępu do substancji odżywczych [30].



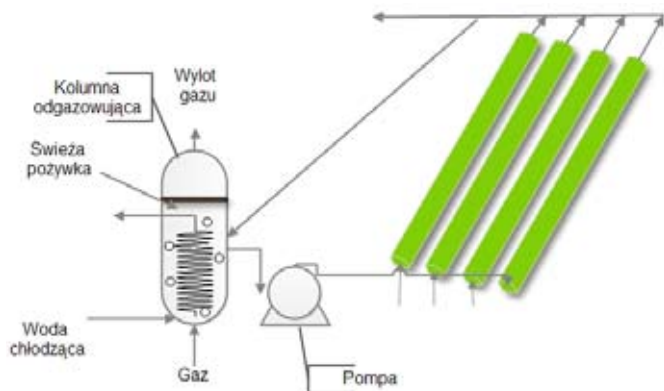
Rys. 4. Fotobioreaktor panelowy [32]

Fotobioreaktor poziomy rurowy

Ten typ fotobioreaktora tworzą ustawiane poziomo serie rurek (Rys. 5), które można łączyć pętlami lub ustawiać pod pewnym kątem. Ich kształt szczególnie dobrze sprawdza się przy hodowli na zewnątrz; ułożenie skierowane ku słońcu skutkuje wysokim współczynnikiem konwersji światła. Mieszanina gazu z CO_2 jest wprowadzana w rurę połączoną z systemem wymiany gazów, zwaną kolumną odgazowującą. Zadaniem tej kolumny jest m.in. usuwanie tlenu powstałego w trakcie fotosyntezy, gdyż może on być przyczyną fotooksydacji, co redukuje wydajność fotosyntezy [33]. Systemy te można spryskiwać wodą w celu chłodzenia, albo układać rurki jedne na drugich; wkładać je do basenów z kontrolą temperatury wody lub regulując temperaturę pożywki. Innym sposobem chłodzenia może być także częściowa recyrkulacja cieczy. Wadą tego typu PBR jest duże zużycie energii, sięgające nawet 2000 W/m^3 , podczas gdy w fotobioreaktorach płaskich panelowych i kolumnach napowietrzanych systemem barbotażowym wartość ta jest na poziomie 50 W/m^3 . Tak duży nakład energii jest konieczny dla uzyskania wysokiej prędkości liniowej zapewniającej uzyskanie warunków turbulentnych, wystarczających do osiągnięcia krótkich cykli jasnych i ciemnych [2]. System z pochylonymi rurami jest podobny do systemu poziomego; różni się pochylem pod kątem kilku stopni w kierunku słońca, co pomaga w bardziej efektywnym wykorzystaniu światła słonecznego. System taki pozwala również na osiągnięcie wyższej wydajności fotosyntezy w stosunku do płaskich fotobioreaktorów panelowych. Fotobioreaktory rurowe są używane w przemyśle do produkcji wartościowych barwników, astaksantyny oraz do produkcji alg *Haematococcus*, *Chlorella* i *Nanochloropsis* [30].

Porównanie wad i zalet wybranych typów fotobioreaktorów [4, 14]

Typ fotobioreaktora	Zalety	Wady
Rurowy	<ul style="list-style-type: none"> wysoki stopień oświetlenia odpowiedni do hodowli na zewnątrz zapewnia dobrą produktywność biomasy 	<ul style="list-style-type: none"> wymaga dużych powierzchni często w tego typu fotobioreaktorach zachodzi proces fotoinhibicji ubogi transfer masy
Kolumnowy	<ul style="list-style-type: none"> dość dobry przyrost biomasy oraz wysoka wydajność fotosyntezy, dodatkowo można łatwo powiększać skalę redukuje proces fotoinhibicji oraz fotooksydacji tani, kompaktowy i łatwy w utrzymaniu dobrze utrzymuje równowagę gazową umożliwia łatwe utrzymanie cykli ciemnych i jasnych wymaga małej powierzchni odpowiedni do hodowli na zewnątrz 	<ul style="list-style-type: none"> mała powierzchnia oświetlenia niski współczynnik powierzchni do objętości możliwość powstania osadów oraz narośli na ścianach
Panelowy	<ul style="list-style-type: none"> wysoki stopień oświetlenia wysoki współczynnik powierzchni do objętości odpowiedni do hodowli na zewnątrz zapewnia wysoką produktywność biomasy gwarantuje jednorodny dostęp do światła w całej hodowli tani w wykonaniu łatwy w konstrukcji, utrzymaniu i czyszczeniu, a także w prowadzeniu hodowli zapewnia wysoką wydajność fotosyntezy dobry do immobilizacji glonów zapewnia niski wzrost poziomu tlenu 	<ul style="list-style-type: none"> ciężko powiększyć skalę – produkcja na większą skalę wymaga użycia wielu modułów oraz elementów je podtrzymujących ciężko kontrolować temperaturę komórki alg przylegają do ścianek tworząc biofilm u niektórych gatunków alg hodowanych w tego typu fotobioreaktorach nasila się stres hydrodynamiczny



Rys. 5. Fotobioreaktor rurowy poziomy [34]

Fotobioreaktor spiralny

Składa się ze zwiniętych giętkich rurek o małej średnicy z oddzielnymi, bądź dołączonymi, jednostkami odgazowującymi. Rurki są transparentne. Kultura hodowlana jest przemieszczana do jednostki odgazowującej przy użyciu pompy odśrodkowej. Wadą tego systemu jest możliwość wystąpienia foulingu, a zaletą utrzymywanie równowagi pomiędzy energią użytą a wydajnością fotosyntezy, mniejsze wymagania energetyczne oraz mniejszy stopień narażania alg na stres mechaniczny. Cały system wymaga niewielkiej powierzchni.

Fotobioreaktor zbiornikowy

To najbardziej konwencjonalny system, w którym mieszanie odbywa się mechanicznie za pomocą mieszadeł o różnych rozmiarach i kształtach. Powietrze wzbogacane w CO₂ wprowadza się od góry zbiornika. Ten typ bioreaktora został zmieniony w fotobioreaktor poprzez zastosowanie oświetlenia zewnętrznego lampami fluorescencyjnymi lub poprzez wykorzystanie włókien optycznych. Wadą jest niski stosunek powierzchni do objętości. Zbiorniki mogą mieć także kształt prostopadłościanów. Zbiorniki o przekroju prostokątnym, w przeciwieństwie do okrągłych, nie wymagają użycia urządzeń mieszających, gdyż mieszanie może być realizowane poprzez odpowiednie umieszczenie dystrybutorów gazu. W fotobioreaktorach zbiornikowych hoduje się najczęściej morskie gatunki alg, takie jak *Chondrus crispus* i *Gracilaria*, używane także do procesu oczyszczania ścieków za pomocą hodowli alg [28].

Fotobioreaktor w formie hybrydy

Fotobioreaktor w formie hybrydy wykorzystuje zalety dwóch różnych fotobioreaktorów dla uzyskania lepszych rezultatów; możliwości wykorzystania wybranych typów fotobioreaktorów opisano w Tablicy I.

Obecnie najczęściej wykorzystywane są fotobioreaktory barbotażowe – z uwagi na niskie koszty utrzymania, wysoki współczynnik powierzchni w stosunku do objętości, brak elementów ruchomych, dość dobry transfer masy i ciepła oraz wydajne usuwanie O₂; popularne są też płaskie panelowe fotobioreaktory, które odpowiednio zmodyfikowane mogą zapewnić maksymalną produktywność, nawet w warunkach zmniejszonego natężenia światła. Do hodowli na zewnątrz najpopularniejsze są poziome fotobioreaktory rurowe, które w warunkach zewnętrznych zapewniają lepszą produktywność niż płaskie panelowe reaktory, sprawdzające się lepiej w warunkach laboratoryjnych.

Podsumowanie

Mikroalgi mają wyższy współczynnik wzrostu niż uprawy polowe. Roczna ilość wyprodukowanego oleju z alg na jednostkę powierzchni, jest o 7–31 razy większa niż dla oleju palmowego, drugiego surowca pod względem wydajności. Algi są bardzo ważnym źródłem biomasy. Konkretne gatunki mogą zapewnić produkcję różnych rodzajów biopaliw [35]. Mogą rosnąć praktycznie wszędzie, nawet w ściekach i stłonej wodzie; nie wymagają żyznych gleb jak rośliny olejowe. Do wzrostu niezbędne jest jednak światło oraz dwutlenek węgla.

Możliwe, że biodiesel z alg w znacznym stopniu uzupełni paliwa płynne otrzymywane z ropy naftowej. Jednak, aby proces jego produkcji stał się opłacalny ekonomicznie, należy go ulepszyć, a pomocą w tym mogą zabiegi inżynierii genetycznej oraz udoskonalanie konstrukcji fotobioreaktorów. Przedstawiona charakterystyka fotobioreaktorów pozwala na odpowiedni ich dobór dla konkretnych hodowli alg.

Literatura

1. Rawat I., Ranjith Kumar R., Mutanda T., Bux F.: *Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production*. Applied Energy 2013, 103, 444–467.
2. Singh R.N., Sharma S.: *Development of suitable photobioreactor for algae production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012, 16, 2347–2353.
3. The American Heritage Dictionary of the English Language, 4th edition, 2000.
4. Kozieł W., Włodarczyk T.: *Glony – produkcja biomasy*. Acta Agrophysica 2011, 17, 1, 105–116.
5. Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A.: *Commercial application of microalgae*. Journal of bioscience and bioengineering 2006, 101, 2, 87–96.
6. Shi J., Podola B., Melkonian M.: *Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae immobilized on twin layers: an experimental study*. Journal of Applied Phycology 2007, 19, 5, 417–423.
7. Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S.: *Microalgae for biodiesel production and other applications: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010, 14, 217–232.
8. Souza S.P., Gopal A.R., Seabra J.E.A.: *Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae – sugarcane biorefinery*. Energy 2015, 81, 1, 373–381.
9. Demirbas M.F.: *Biofuels from algae for sustainable development*. Applied Energy 2011, 88, 3473–3480.
10. Demirbas A.: *Production of biodiesel from algae oils*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2009, 31, 163–168.
11. Chisti Y.: *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 2007, 25, 294–306.
12. Brenna L., Owende P.: *Biofuels from microalgae — A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010, 14, 2, 557–577.
13. Singha J., Gu S.: *Commercialization potential of microalgae for biofuels production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012, 14, 9, 2596–2610.
14. Yadala S., Cremaschi S.: *Design and optimization of artificial cultivation units of algae*. Energy 2014, 78, 23–39.
15. Lundquist T.J., Woertz I.C., Quinn N.W.T., Benemann J.R.: *A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production*. Energy Biosciences Institute, University of California, Berkeley, California, October 2010.
16. Sánchez Mirón A., Cerón García M.C., Contreras Gómez A., García Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y.: *Shear stress tolerance and biochemical characterization of Phaeodactylum tricornutum in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors*. Biochemical Engineering Journal 2003, 16, 3, 287–297.
17. Holtermann T., Madlener R.: *Assessment of the technological development and economic potential of photobioreactors*. Faculty of Business and Economics 2009.
18. Eriksen N.T.: *The technology of microalgal culturing*. Biotechnology Letters 2008, 30, 1525–1536.
19. Barbosa M.J.G.V.: *Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation*. PhD thesis. Wageningen University, The Netherlands 2003.
20. Suali E., Sarbatly R.: *Conversion of microalgae to biofuel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012, 16, 4316–4342.
21. Schenk P.M., Thomas-Hall S.R., Stephens E., Marx U.C., Mussgnug J.H., Posten C., Kruse O., Hankamer B.: *Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production*. Bioenergy Research 2008, 1, 20–43.
22. Chen C.Y., Saratale G.D., Lee C.M., Chen P.C., Chang J.S.: *Phototrophic hydrogen production in photobioreactors coupled with solar-energy-excited optical fibers*. International Journal of Hydrogen Energy 2008, 33, 6886–6895.
23. Das P., Lei W., Aziz S.S., Obbard J.P.: *Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light*. Bioresource Technology 2011b, 102, 3883–3887.
24. Leite G.B., Abdelaziz A.E.M., Hallenbeck P.C.: *Algal biofuels: Challenges and opportunities*. Bioresource Technology 2013, 145, 134–141.
25. Kumar K., Dasgupta C.N., Nayak B., Lindblad P., Das D.: *Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria*. Bioresource Technology 2011, 102, 4945–4953.
26. Richmond A., Hu Q.: *Handbook of Microalgal Culture*. Blackwell Publishers 2004, 57–82.
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Bubble_column_reactor 01.07.2016 r.
28. Li Y., Horsman M., Wu N., Lan C.Q., Dubois-Calero N.: *Algae-based biofuels*. Biotechnology Advances 2008, 24, 815–820.
29. <http://technologyinscience.blogspot.com/2012/08/different-types-of-fermentors.html#.V3QYAfkXIW> 01.07.2016 r.
30. Norsker N.H., Barbosa M.J., Vermuë M.H., Wijffels R.H.: *Microalgal production — a close look at the economics*. Biotechnology Advances 2011, 29, 24–27.
31. Ugwu C.U., Aoyagi H., Uchiyama H.: *Photobioreactors for mass cultivation of algae*. Bioresource Technology 2008, 99, 4021–4028.
32. Posten C.: *Design and Performance Parameters of Photobioreactors*. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 2012, 21, 1, 38–45.
33. Miron A.S., Gomez A.C., Camacho F.G., Grima E.M., Chisti Y.: *Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae*. Journal of Biotechnology 1999, 70, 249–270.
34. <http://biofuels2010.blogspot.com/2010/11/manufacturing-processes-of-algae.html> 01.07.2016 r.
35. Demirbas A., Demirbas M.F.: *Importance of algae oil as a source of biodiesel*. Energy Conversion and Management 2011, 52, 1, 163–170.

Mgr inż. Agnieszka PATYNA ukończyła studia z zakresu biotechnologii w rolnictwie i produkcji żywności oraz inżynierii środowiska na Uniwersytecie Opolskim (2015). Jest doktorantką na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Specjalność – badania związane z sedymentacją alg oraz projektowaniem urządzeń do ich hodowli.
e-mail: patyna.a@gmail.com

Prof. dr hab. inż. Stanisław WITCZAK ukończył studia w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Opolu (1978). Jest kierownikiem Katedry Inżynierii Procesowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa, mechanika i budowa maszyn w zakresie aparatury procesowej.

Aktualności z firm

News from the Companies

Dokończenie ze strony 633

Lanxess po raz szósty w indeksie zrównoważonego rozwoju Dow Jones

Koncern Lanxess po raz szósty z rzędu znalazł się w światowym indeksie zrównoważonego rozwoju Dow Jones (DJSI). Skład tego indeksu określany jest raz do roku na podstawie czynników środowiskowych, społecznych i związanych z ładem korporacyjnym o istotnym znaczeniu finansowym. W tym roku koncernowi Lanxess przyznano szczególne wyróżnienie za wyniki w dziedzinie procesów zarządzania innowacjami oraz za strategię klimatyczną. Na początku roku, osiągnąwszy swoje cele klimatyczne na rok

2015, producent specjalistycznych środków chemicznych sam wyznaczył sobie nowe cele z zakresu ochrony klimatu. Obejmują one zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 25 % w perspektywie do roku 2025.

(<https://www.plastech.pl/>, 12.09.2016)

Spotkanie absolwentów PWr rocznik 1961/62

24 września br. pięknym budynku NOT we Wrocławiu odbyło się spotkanie wspomnieniowe inżynierów chemii, absolwentów rocznika 1961/62.

(inf. Andrzej Puszyński SITPChem O/Wrocław, 1 października 2016 r.)

Dokończenie na stronie 643