

GLONY – PRODUKCJA BIOMASY

Wojciech Kozieł, Teresa Włodarczyk

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: w.koziel@ipan.lublin.pl

Streszczenie. Glony mogą służyć do produkcji biomasy, którą następnie można wykorzystywać na wiele sposobów. Biomasa może posłużyć do produkcji biodiesla, biogazu, energii elektrycznej, a także ciepłej. Ze względu na rosnące ceny ropy naftowej, a także wzrost zanieczyszczenia środowiska, prowadzone są co raz szersze badania w zakresie wykorzystania biomasy, jako źródła energii bioodnawialnej. Obecnie testowane są liczne systemy namnażania glonów, które często charakteryzują się różną wydajnością produkcji, przy czym wydajność zależy nie tylko od konstrukcji danego fotobioreaktora, lecz również od składników pokarmowych dostarczanych podczas namnażania, natężenia światła, stężenia CO₂ i temperatury.

Słowa kluczowe: biopaliwa, algi, biomasa, fotobioreaktory

WSTĘP

Glony stają się obecnie coraz bardziej atrakcyjne ze względu na możliwość ich szerokiego zastosowania. Można je spożywać, pozyskiwać z nich związki bioaktywne, stosować do produkcji leków, bądź też do produkcji biomasy. Jednak żeby wykorzystać potencjał tkwiący w algach, należy opracować odpowiednie metody ich namnażania. Niezbędne do tego są bioreaktory, których obecnie jest kilka rodzajów, jednak nie wszystkie nadają się do produkcji biomasy na dużą skalę. Należy poznać wszelkie zalety i ograniczenia, które niosą ze sobą konkretne typy bioreaktorów, a także reakcje zachodzące wewnątrz nich, jak i ich wpływ na hodowaną populację.

Pierwsze próby otwartej produkcji glonów zostały podjęte w Niemczech podczas II wojny światowej. Stanowiły one wówczas pokarm uzupełniający codzienną dietę. Następnie grupa pracowników z Carnegie Institute w Waszyngtonie rozpoczęła produkcję glonów, która miała na celu zmniejszenie ilości CO₂ w powietrzu (Burlew 1953). W latach 70 ubiegłego stulecia rozpoczęto produkcję

glonów w Europie Wschodniej, Izraelu oraz Japonii. Miała ona charakter komercyjny, hodowane algi były sprzedawane jako zdrowa żywność. USA jako pierwszy kraj wykorzystowały otwarty staw hodowlany jako oczyszczalnię ścieków. Pozyskaną w ten sposób biomasę zużyto do produkcji metanu, który wykorzystywano następnie jako źródło energii (Burlaw 1953, Oswald i Golueke 1960). Obecnie algi namnażane są w systemach otwartych (stawy hodowlane) lub zamkniętych (fotobioreaktory). Wraz z upływem czasu znaczenie glonów wzrastało, rozpoczęto produkcję chemikaliów z alg, charakteryzujących się wysoką czystością (Lorenz i Cysewski 2003, Borowitzka 1999), które mogą stanowić użyteczny składnik diety zarówno dla ludzi, jak i zwierząt (Dallaire i in. 2007). Obecnie wykorzystywane są także do produkcji pewnych związków pozakomórkowych, jako systemy immobilizacyjne (Chetsumon i in. 1994), jako sorbenty metali ciężkich (Wilde i Benemann 1993, Lodeiro i in. 2005, Karthikeyan i in. 2007), a ponadto posiadają zdolność wiązania CO₂ (Benemann 1997, Sung i in. 1999, Chae i in. 2006).

ZNACZENIE GLONÓW DLA EKOSYSTEMU I GOSPODARKI

W przyrodzie glony stanowią istotny element ekosystemu, ponieważ:

- stanowią pokarm dla innych organizmów,
- są praktycznie jedynymi producentami materii organicznej w wodach,
- posiadają decydujący wpływ na klimat Ziemi (wzbogacanie zbiorników wodnych w tlen),
- regulują dostęp światła słonecznego dla organizmów wodnych,
- uczestniczą w procesach tworzenia i rozpadu skał,
- mają udział w krążeniu pierwiastków w przyrodzie np. węgla i tlenu,
- są ważnym składnikiem planktonu.

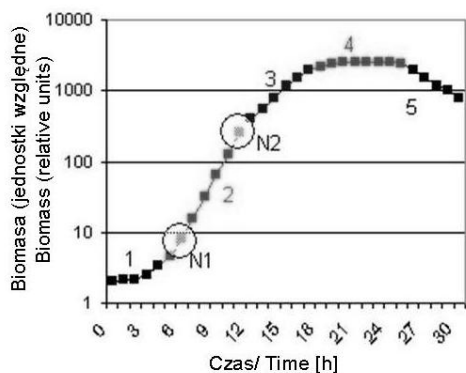
Znaczenie glonów dla gospodarki człowieka jest dużo szersze niż mogłoby się wydawać. Glony mogą być wykorzystywane m. in. jako:

- pokarm, uznawany czasami za przysmak- szczególnie brunatnice i krasnorosty (Simoons i Frederick 1991),
- źródło witamin, jodu, boru, miedzi, soli potasowych i sodowych (Simoons i Frederick 1991),
- pokarm w gospodarce ryb i produkcji zwierząt (listownica, morszczyń),
- nawóz wzbogacający glebę w próchnicę, poprawiający jej strukturę,
- wskaźniki wykorzystywane do badania stopnia zanieczyszczenia wód np. chlorella,
- surowce do produkcji kosmetyków i wyrobów stosowanych w medycynie (wata alginowa-brunatnice, agar- krasnorosty, antybiotyki- chlorella, substancje bakteriobójcze, witaminy grupy B),
- biopaliwa, biogazy (Frąc i in. 2009).

CHARAKTERYSTYKA GLONÓW

Algi są samożywnymi organizmami, które posiadają prostą, beztkankową budowę. Są najliczniejszą grupą samożywnych organizmów wodnych. Mogą być jedno- lub wielokomórkowe. Ponadto posiadają zielone chloroplasty, są zdolne do przeprowadzenia procesu fotosyntezy, a co za tym idzie są również producentami tlenu. Mogą się rozmnażać płciowo lub bezpłciowo. Zamieszkują środowisko wodne lub bardzo wilgotne (Wilk-Woźniak 2003, The American Heritage Dictionary of the English Language).

W przebiegu wzrostu populacji mikroglonów w hodowli okresowej, rozumianym jako przyrost liczby komórek w jednostkowej objętości pożywki, można wyróżnić następujące fazy (rys. 1): adaptacyjną (lag, indukcyjną) – 1, wykładniczą (logarytmiczną) – 2, spowolnienia – 3, stacjonarną – 4 i zamierania – 5.



Rys. 1. Krzywa wzrostu populacji glonów jednokomórkowych (Fogg i Thake 1987). N_1 – masa początkowa N_2 – masa końcowa

Fig. 1. Curve of algae population growth (Fogg and Thake 1987). N_1 – initial weight, N_2 – final weight

Każdą z wymienionych faz cechuje właściwy dla komórki metabolizm oraz przebieg procesów fizjologicznych takich jak fotosynteza, respiracja, asymilacja jonów czy inne. Tempo wzrostu, a także podziału komórek jest determinowane przez wypadkową wszystkich wymienionych wyżej procesów, która tym samym określa dynamikę wzrostu populacji na każdym etapie jej rozwoju.

Tempo wzrostu biomasy alg w funkcji czasu może być szacowane na podstawie fazy wykładniczej za pomocą *specific growth rate*

(właściwy współczynnik wzrostu), który wyrażany jest wzorem:

$$\mu = \frac{\ln(N_2 - N_1)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

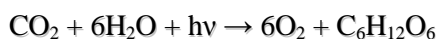
gdzie: μ – właściwy współczynnik wzrostu, N_1 i N_2 – masa początkowa oraz końcowa; t_1 i t_2 – czas początkowy oraz końcowy pomiaru.

PRODUKCJA BIOMASY

Biomasa

Obecnie nie istnieje jednoznacznie sformułowanie pojęcia biomasy, ponieważ różne instytucje podają odmienne definicje. Według definicji Unii Europejskiej biomasa oznacza podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpady i pozostałości przemysłu rolnego (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i miejskich (Dyrektywa 2001/77/WE). Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 9 grudnia 2004 roku biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, jak również części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji (Dz. U. Nr 267, poz. 2656). Ogólnie można przyjąć, iż biomasa jest masą materii organicznej, która jest zawarta w organizmach zwierzęcych i roślinnych. Wyrażana jest w jednostkach tzw. świeżej masy (naturalna masa organizmów) oraz w jednostkach tzw. suchej masy (bezwodna masa organizmów).

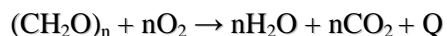
Biomasa powstaje na drodze reakcji fotosyntezy, w wyniku której w chlorofilu dwutlenek węgla łączy się z wodą w węglowodany (cukry). W ten sposób energia promieniowania słonecznego ($h\nu$), jest przetwarzana w energię chemiczną.



W wyniku fotosyntezy powstaje tlen, którego maksymalna wydzielona ilość może wynosić około $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$. Zbyt duża ilość rozpuszczonego tlenu w fotobioreaktorze może prowadzić do uszkodzenia komórek glonów, co jest skutkiem zachodzącego procesu fotoutleniania (Molina Grima i in. 2001).

Jeden mol dwutlenku węgla bierze udział w akumulacji $Q = 470 \text{ kJ}$ energii. Może ona być następnie wykorzystana jako źródło pokarmu dla zwierząt i ludzi bądź też jako nośnik energii cieplnej, mechanicznej lub elektrycznej.

W wyniku spalania różnych postaci biomasy powstaje dwutlenek węgla, para wodna oraz wydziela się ciepło, co można przedstawić za pomocą następującej reakcji:

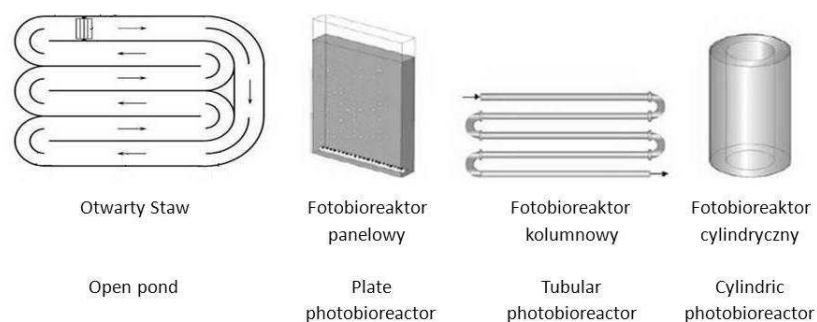
**Wymagania**

Produkcja biomasy z alg wymaga odpowiednich ilości dwutlenku węgla, światła, wody, soli mineralnych, które są niezbędne do jej wzrostu. Podstawowymi pierwiastkami koniecznymi do wzrostu glonów są azot, fosfor oraz żelazo.

Temperatura hodowli, w zależności od gatunku, powinna oscylować w granicach 20-30°C. Efektywność hodowli można zwiększyć poprzez naświetlanie nocą, co spowoduje, iż w reaktorze nieprzerwanie będzie zachodziła fotosynteza. Intensywna hodowla glonów może przyczynić się do poprawy stanu środowiska naturalnego. Około 50% suchej biomasy glonów stanowi węgiel pochodzący z CO₂, który zużywany jest w ilości 183 g na wyprodukowanie 100 g biomasy (Sanchez Miron i in. 2003, Chisti 2007). Do produkcji alg można również wykorzystać ścieki komunalne, które zawierają duże ilości fosforu oraz azotu, przy czym fosfor należy stosować w nadmiarze, ponieważ wchodzi on chętnie w reakcje z jonami żelaza, co w konsekwencji prowadzi do powstania kompleksów i spadku dostępności tego pierwiastka w podłożu dla mikroglonów. Jak więc widać uprawa alg, poza aspektami ekonomicznymi i bezpieczeństwa energetycznego, może się też przyczynić do ochrony wód i powietrza. Do określenia minimalnych wymagań pokarmowych dla danej hodowli, można użyć przybliżonej formuły cząsteczkowej zaprezentowanej w 2004 roku przez Grobbelaara. Określa ona biomasę mikroglonów wyrażoną za pomocą następującego wzoru CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01} (Chisti 2007, Molina Grima i in. 1999).

Systemy produkcji glonów

Istnieje kilka problemów dotyczących wyboru metody hodowli glonów, jak i samego stosowania danej metody. Obecnie stosuje się stawy hodowlane lub fotobioreaktory – kolumnowe, panelowe, cylindryczne (rys. 2). (Sanchez Miron i in. 1999, Molina Grima i in. 1999, Schenk i in. 2008, Pulz 2001, Carvahlo 2006) Oba rodzaje metod różnią się wydajnością, kosztami utrzymania, a także możliwościami uprawy.



Rys. 2. Różnorodne typy systemów produkcji alg (Schenk i in. 2008, Sanchez i in. 1999)
Fig. 2. Different types of algae growing systems (Schenk *et al.* 2008, Sanchez *et al.* 1999)

Hodowla glonów może być oświetlona zarówno światłem słonecznym jak i sztucznym, bądź też można wykorzystać oba rodzaje światła jednocześnie. Do bioreaktorów dających możliwość naturalnego oświetlenia dużej powierzchni hodowli można zaliczyć otwarte stawy hodowlane (Hase i in. 2000), fotobioreaktory panelowe (Hu i in. 1996), kolumnowe poziome (Camacho Rubio i in. 1999), a także kolumnowe pochyłe (Ugwu i in. 2002). W skali laboratoryjnej stosuje się zwykle oświetlenie sztuczne (zewnętrzne lub wewnętrzne), np. lampy fluorescencyjne, bądź też inne źródła światła. Warunki panujące w niektórych typach fotobioreaktorów można łatwo kontrolować, m.in. poprzez umieszczenie ich w pomieszczeniu o stałej temperaturze, szczególnie w przypadku bioreaktorów o małych rozmiarach. Dla dużych systemów zewnętrznych takich jak fotobioreaktory kolumnowe kontrola warunków wewnętrznych nie jest możliwa bez zastosowania zaawansowanych technik. Zestawienie zalet i wad systemów namnażania biomasy zawiera zestawienie 1 (Ugwu i in. 2007).

a) Otwarte stawy

Produkcja alg w otwartych stawach hodowlanych była badana, rozwijana i stosowana w ostatnich latach (Hase i in. 2000, Bousiba i in. 1988, Tredici i Materassi 1992). Otwarte stawy hodowlane mogą być dwojakiego rodzaju: naturalne, do których można zaliczyć jeziora, laguny i stawy, oraz sztuczne stawy lub inne zbiorniki. Zazwyczaj wykorzystywane są płytkie stawy, sztuczne zbiorniki lub specjalne stawy w postaci pętli recyrkulacyjnej. Głębokość kanału tworzącego pętlę wynosi około 0,3 m. Zawiesina glonów jest wprawiana w ruch za pomocą turbiny, dzięki czemu niwelowane jest zjawisko sedimentacji glonów w zbiorniku. Stawy takie są wykładane białym plastikiem. Ich główną zaletą jest prosta konstrukcja oraz obsługa. Jednak przy zastosowaniu takiego systemu należy liczyć się ze zjawiskami takimi jak dyfuzja CO₂ do atmosfery, czy odparowywanie wody ze zbiornika. Ponadto wymagają one znacznej powierzchni pod uprawę, nie dają możliwości kontrolowania warunków hodowli, a produkcja biomasy nie jest zbyt wydajna (Ugwu i in. 2007).

b) Fotobioreaktory panelowe

Już w 1953 zaprezentowano pracę opisującą płaskie naczynia jako dobry system hodowli alg (Milner 1953). Idąc tą drogą w 1985 roku zaprojektowano fotobioreaktor panelowy wyposażony w lampę fluorescencyjną (Samson i Leduy 1985), natomiast rok później zaprojektowano reaktor przeznaczenia zewnętrznego, który zbudowano z grubego, przezroczystego tworzywa PVC (Ramos de Ortega i Roux 1986). Wraz z upływem czasu prowadzono coraz szersze prace nad tego typu reaktorami a rezultaty opisujące warunki namnażania różnych typów glonów przedstawiono w wielu publikacjach (Tredici i Materassi 1992, Hu i in. 1996, Zhang i in. 2002, Hoekema i in. 2002). Główną zaletą fotobioreaktorów panelowych jest duża powierzchnia naświetlenia hodowli. Fotobioreaktory pane-

lowe są przeważnie wykonane z przezroczystych tworzyw dających możliwość maksymalnego wykorzystania energii słonecznej. Akumulacja tlenu w tego typu reaktorach jest mniejsza w porównaniu do fotobioreaktorów cylindrycznych. Wykazano również, iż w fotobioreaktorach panelowych jest możliwe osiągnięcie wysokowydajnej fotosyntezy (Hu i in. 1996, Richmond 2000), dzięki czemu są one bardzo użyteczne do produkcji biomasy. Jednak oprócz wszystkich przedstawionych zalet posiadają pewne wady, które ograniczają ich użyteczność. Poniżej zestawienie systemów hodowli glonów.

System	Zalety	Wady
Otwarty staw	Względnie ekonomiczny, łatwy do oczyszczenia po zakończonej uprawie, dobry do namnażania biomasy glonów.	Niewielka kontrola nad warunkami uprawy, trudna w utrzymaniu przez długi okres, uboga produkcja biomasy, ograniczona ilość uprawianych gatunków, duża powierzchnia uprawy, glony łatwo ulegają skażeniu.
Fotobioreaktor Panelowy	Duża powierzchnia oraz wysoki stopień oświetlenia, odpowiednie do hodowli na zewnątrz, dobre do immobilizacji glonów, dobra wydajność produkcji, względnie tani, łatwy w czyszczeniu i prowadzeniu hodowli, niski wzrost poziomu tlenu.	Produkcja na większą skalę wymaga wielu modułów panelowych i materiałów podtrzymujących je, trudna kontrola temperatury, ściany pokryte w pewnym stopniu naraślą, możliwość wystąpienia u niektórych gatunków glonów stresu hydrodynamicznego.
Fotobioreaktor Kolumnowy	Duża powierzchnia naświetlenia hodowli, względnie tani, odpowiedni do hodowli na zewnątrz, dosyć dobry przyrost biomasy.	Występuje gradient pH, w reaktorze rozpuszcza się tlen oraz CO ₂ , powstaje osad oraz naraśle na ścianach, wymaga dużej przestrzeni.

System	Zalety	Wady
Fotobioreaktor Cylindryczny	Wysoka wydajność produkcji biomasy, dobra cyrkulacja uprawy, niewielkie naprężenia podczas mieszania, niski pobór energii, łatwy w sterylizacji, łatwe w obsłudze, dobre do immobilizacji glonów, redukuje efekty fotoinhibicji oraz fotooksydacji.	Dosyć mała powierzchnia naświetlenia, która zmniejsza się jeszcze bardziej wraz ze zwiększeniem skali produkcji, ich konstrukcja wymaga specjalnych materiałów, możliwość wystąpienia naprężeń wewnątrz fotobioreaktora.

c) Fotobioreaktory kolumnowe

Jest to jeden z najbardziej odpowiednich typów fotobioreaktora do prowadzenia hodowli glonów na zewnątrz. Są one przeważnie zbudowane ze szkła bądź plastiku. Biomasa znajdująca się w rurach ulega cyrkulacji wewnątrz systemu, którą wywołują pompy powietrzne lub system powietrzny. Występują w postaci poziomych rur lub serpentyn (Chaumont 1988, Molina Grima 2001), pionowych rur (Pirt i in. 1983), jak również pochylonych rur (Lee and Low 1991, Ugwu 2002). Napowietrzanie oraz mieszanie hodowli wykonuje się przeważnie za pomocą pomp powietrznych. Jedną z podstawowych wad fotobioreaktorów kolumnowych jest mało wydajna produkcja biomasy, która spada wraz ze zwiększaniem się skali systemu. Kolejnym ograniczeniem produkcji biomasy jest zjawisko fotoinhibicji (Vonshak i Torzillo 2004) oraz utrudnienia w kontroli temperatury hodowli. Można stosować termostaty w celu ustalenia żądanej temperatury produkowanej biomasy, lecz jest to narzędzie trudne w zastosowaniu i drogie w użyciu.

d) Fotobioreaktory cylindryczne

Do tej pory projektowano różne rodzaje, oraz różne rozmiary tego typu fotobioreaktora (Choi i in. 2003, Vega-Estrada i in. 2005, Garcia-Malea Lopez i in. 2006, Kaewpintong i in. 2007). Fotobioreaktory cylindryczne zajmują niewielką powierzchnię, są dosyć tanie w eksploatacji oraz stosunkowo łatwe w obsłudze (Sanchez Miron i in. 2003). Dodatkowo wydają się być dobrym narzędziem do produkcji alg na skalę przemysłową. Ograniczenia wynikające ze stosowania fotobioreaktorów cylindrycznych zostały przedstawione w poniższym zestawieniu (Ugwu i in. 2007).

Fotobioreaktory odznaczają się sporo wyższą wydajnością produkcji biomasy niż otwarte stawy hodowlane. Dają również możliwość kontrolowania warunków w nich panujących, jednak są droższe w utrzymaniu i budowie.

Problemem w produkcji biomasy jest też zmienne pH hodowli, spowodowane zużywaniem CO₂ przez zawieszoną przemieszczającą się w fotobioreaktorze (Camacho Rubio i in. 1999). Wahania pH można zniwelować za pomocą iniekcji CO₂ do hodowli (Molina Grima i in. 1999).

Najważniejsze korzyści płynące z wykorzystania biomasy to:

- wytwarzanie energii tanim kosztem,
- efektywne zagospodarowanie bioodpadów, bez konieczności ich utylizacji,
- zmniejszenie wykorzystywania paliw kopalnych.

PODSUMOWANIE

Rozwój i doskonalenie systemów do produkcji biomasy z glonów pozwala przypuszczać, iż w najbliższym okresie nastąpi wyraźny wzrost jej produkcji. Głównym powodem takiego stanu rzeczy jest szerokie spektrum możliwości wykorzystania biomasy glonowej, która umożliwia produkcję biodiesla, biogazu, energii elektrycznej czy też ciepłej. Jej dodatkowym atutem jest stosunkowo mała powierzchnia uprawy w porównaniu z innymi surowcami. Należy podkreślić również pozytywny wpływ produkcji biomasy z alg na środowisko naturalne (pochłanianie CO₂, oczyszczanie ścieków). Ze względu na wszystkie zalety, rozpoczęcie produkcji takiego rodzaju biomasy na skalę przemysłową, wydaje się więc kwestią czasu. Aby się tak jednak stało, dopracowania wymagają procesy zarówno samej produkcji surowca, jak i jego późniejszego wykorzystania.

PIŚMIENNICTWO

- Benemann J.R., 1997. CO₂ mitigation with microalgal systems. *Energy Convers. Manage*, 38, 475-479.
- Borowitzka M.A., 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *J. Biotechnol.* 70, 313-321.
- Boussiba S., Sandbank E., Shelef G., Cohen Z., Vonshak A., Ben-Amotz A., Arad S., Richmond A., 1988. Outdoor cultivation of the marine microalga *Isochrysis galbana* in open reactors. *Aquaculture* 72, 247-253.
- Burlew 1953. *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant*. Carnegie Institution of Washington, Washington, DC, 357.
- Camacho Rubio F., Acien Fernandez F.G., Garcia Camacho F., Sanchez Perez J.A., Molina Grima E., 1999. Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactor for microalgal culture. *Biotechnol. Bioeng.*, 62, 71-86.
- Camacho Rubio F., Acien Fernandez F.G., Sanchez Perez J.A., Garcia Camacho F., Molina Chisti Y., 2002. Growth and characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture. *Enzyme Microb. Technol.*, 31, 1015-1023.

- Carvalho A.P., Meireles L.A., Malcata F.X., 2006. Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnol. Prog.*, 22, 1490-1506.
- Chae S.R., Hwang E.J., Shin H.S., 2006. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photobioreactor. *Bioresource Technol.*, 97, 322-329.
- Chetsumon A., Maeda I., Umeda F., Yagi K., Miura Y., Mizoguchi T., 1994. Antibiotic production by the immobilized cyanobacterium, *Scytonema* sp. TISTR 8208, in a seaweed-type photobioreactor. *J. Appl. Phycol.*, 6, 539-543.
- Chaumont D., Thepenier C., Gudin C., 1988. Scaling up a tubular photobioreactor for continuous culture of *Porphyridium cruentum* – from laboratory to pilot plant. In: Stadler, T., Morillon, J., Verdu, M.S., Karamanos, W., Morvan, H., Christiaen, D. (Eds.), *Algal Biotechnology*. Elsevier Applied Science, London, 199-208.
- Chisti Y. Biodiesel from microalgae, 2007. *Biotechnol. Adv.*, 25, 294-306.
- Choi S.L., Suh I.S., Lee C.G., 2003. Lumostatic operation of bubble column photobioreactors for *Haematococcus pluvialis* cultures using a specific light uptake rate as a control parameter. *Enzyme Microb. Technol.*, 33, 403-409.
- Dallaire V., Lessard P., Vandenberg G., de la Nouë J., 2007. Effect of algal incorporation on growth, survival and carcass composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry. *Bioresource Technol.*, 98, 1433-1439.
- Fogg G. E., Thake B., 1987. *Algal cultures and phytoplankton ecology*. University of Wisconsin Press.
- Fraç M., Jezierska-Tys S., Tys J., 2009. Algi – energia jutra (biomasa, biodiesel). *Acta Agrophysica*, 13(3), 627-638.
- García-Malea Lopez, M.C., Del Río Sanchez, E., Casas Lopez, J.L., Acien Fernandez, F.G., Fernandez Sevilla, J.M., Rivas, J., Guerrero, M.G., Molina Grima, 2006. Comparative analysis of the outdoor culture of *Haematococcus pluvialis* in tubular and bubble column photobioreactors. *J. Biotechnol.*, 123, 329-342.
- Hase R., Oikawa H., Sasao C., Morita M., Watanabe Y., 2000. Photosynthetic production of microalgal biomass in a raceway system under greenhouse conditions in Sendai City. *J. Biosci. Bioeng.*, 89, 157-163.
- Hoekema S., Bijmans M., Janssen M., Tramper J., Wijffels R.H., 2002. A pneumatically agitated flat-panel photobioreactor with gas recirculation: anaerobic photoheterotrophic cultivation of a purple nonsulfur bacterium. *Int. J. Hydro. Energy*, 27, 1331-1338.
- Hu Q., Guterman H., Richmond A., 1996. A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of phototrophs. *Biotechnol. Bioeng.*, 51, 51-60.
- Kaewpintong K., Shotipruk A., Powtongsook S., Pavasant P., 2007. Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor. *Bioresource Technol.*, 98, 288-295.
- Karthikeyan, S., Balasubramanian, R., Iyer, C.S.P., 2007. Evaluation of the marine algae *Ulva fasciata* and *Sargassum* sp. for the biosorption of Cu(II) from aqueous solutions. *Bioresource Technol.*, 98, 452-455.
- Lee Y.K., Low C.S., 1991. Effect of photobioreactor inclination on the biomass productivity of an outdoor algal culture. *Biotechnol. Bioeng.*, 38, 995-1000.
- Lodeiro P., Cordero B., Barriada J.L., Herrero R., Sastre de Vicente M.E., 2005. Biosorption of cadmium by biomass of brown marine macroalgae. *Bioresource Technol.*, 96, 1796-1803.
- Lorenz R.T., Cysewski G.R., 2003. Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *Trends Biotechnol.*, 18, 160-167.

- Milner H.W., 1953. Rocking tray. In: Burlew, J.S. (Ed.), *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant*. Carnegie Institution, Washington, DC, 600, 108.
- Molina Grima E., Acien Fernandez F.G., Garcia Camacho F., Chisti Y., 1999. Photobioreactors: light regime, mass transfer and scaleup. *J. Biotechnol.*, 70, 231-247.
- Molina Grima E., Fernandez J., Acien Fernandez F.G., Chisti Y., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *J. Biotechnol.*, 92, 113-131.
- Oleszkiewicz J., 1999. Eksploatacja składowiska odpadów. *Poradnik decydena*. LEM PROJEKT s.c., Kraków.
- Oswald W.J., Golueke C.G., 1960. Biological transformation of solar energy. *Adv. Appl. Microbiol.*, 2, 223-262.
- Pirt S.J., Lee Y.K., Walach M.R., Pirt M.W., Balyuzi H.H.M., Bazin M.J., 1983. A tubular photobioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: design and performance. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 33B, 35-38.
- Pulz O., 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57, 287-293.
- Ramos de Ortega, A., Roux, J.C., 1986. Production of *Chlorella* biomass in different types of flat bioreactors in temperate zones. *Biomass* 10, 141-156.
- Richmond A., 2000. Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. *J. Appl. Phycol.* 12, 441-451.
- Samson R., Leduy A., 1985. Multistage continuous cultivation of bluegreen alga *Spirulina maxima* in the flat tank photobioreactors. *Can. J. Chem. Eng.*, 63, 105-112.
- Sanchez Miron A., Contreras Gomez A., Garcia Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y., 1999 Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. *J. Biotechnol.*, 70, 249-270
- Sanchez Miron A., Ceron Garcia M.C., Contreras Gomez A., Garcia Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y., 2003. Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. *Biochem. Eng. J.*, 16, 287-297
- Schenk P.M., Thomas-Hall S.R., Stephens E., Marx U.C., Mussgnug J.H., Posten C., Kruse O., Hankamer B., 2008 Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenerg Res.*, 1, 20-43.
- Simoons F., 1991. *Seaweeds and Other Algae*. Food in China: A Cultural and Historical Inquiry. CRC Press, 6, 179-190.
- Sung K.D., Lee J.S., Shin C.S., Park S.C., Choi M.J., 1999. CO₂ fixation by *Chlorella* sp. KR-1 and its cultural characteristics. *Bioresource Technol.*, 68, 269-273.
- The American Heritage Dictionary of the English Language: 4th ed, 2000.
- Tredici M.R., Materassi R., 1992. From open ponds to vertical alveolar panels: the Italian experience in the development of reactors for the mass cultivation of photoautotrophic microorganisms. *J. Appl. Phycol.*, 4, 221-231.
- Ugwu C.U., Ogbonna J.C., Tanaka H., 2002. Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 58, 600-607.
- Ugwu C.U., Aoyagi H., Uchiyama H., 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, 99, 4021-4028.

- Vega-Estrada J., Montes-Horcasitas M.C., Domini'gues-Bocanegra A.R., Canizares-Villanueva R.O., 2005. *Haematococcus pluvialis* cultivation in split-cylinder internal-loop airlift photobioreactor under aeration conditions avoiding cell damage. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 68, 31-35.
- Vonshak A., Torzillo G., 2004. Environmental stress physiology. In: Richmond, A. (Ed.), *Handbook of Microalgal Culture*. Blackwell Publishers, Oxford, 57-82.
- Wilde E.W., Benemann J.R., 1993. Bioremoval of heavy metals by the use microalgae. *Biotechnol. Adv.*, 11, 781-812
- Wilk-Woźniak E., 2003. Różnorodność glonów planktonowych w wodach Górnego Śląska. *Przyroda Górnego Śląska, Centrum Dziedzictwa Przyrody Górnego Śląska z Katowic*, 34, 10-12.
- Zhang K., Kurano N., Miyachi S., 2002. Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor. *Bioproc. Biosys. Bioeng.*, 25, 97-101.

ALGAE – BIOMASS PRODUCTION

Wojciech Kozieł, Teresa Włodarczyk

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: w.koziel@ipan.lublin.pl

Abstract. Algae can be utilised for biomass production, which can be taken advantage of in many ways. Biomass can be used for biodiesel, biogas, electricity or heat production. For the reason of increasing prices of crude oil and escalation of environment pollution, scientific investigations in a wide range of using biomass as a renewable energy source are conducted. Many reproduction systems of algae, which are often characterised by different rates of production yield, are tested for the present. Their productivity depends not only on the design of a given photobioreactor, but also on nutrients supplied during the reproduction, luminous intensity, CO₂ concentration and temperature.

Key words: biofuels, algae, biomass, photobioreactors