

## ALGI – ENERGIA JUTRA (BIOMASA, BIODIESEL)

*Magdalena Frac<sup>1</sup>, Stefania Jezierska-Tys<sup>2</sup>, Jerzy Tys<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin  
e-mail: m.frac@ipan.lublin.pl

<sup>2</sup>Katedra Mikrobiologii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy  
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin

**Streszczenie.** Mikroalgi mogą być wykorzystywane do produkcji różnych typów biopaliw. Należą do nich: metan produkowany przez beztlenowy rozkład biomasy glonów, biodiesel powstający z oleju pozyskanego z alg i fotobiologicznie produkowany biowodór. Idea wykorzystania mikroalg jako odnawialnego źródła paliwa nie jest nowa i obecnie ze względu na wzrost cen ropy naftowej coraz częściej brana jest poważnie pod uwagę. W prezentowanej pracy przedstawiono możliwości produkcji biodiesla z mikroalg. Omówiono produkcję alg w fotobioreaktorach i przetwarzanie ich biomasy w biodiesel.

**Słowa kluczowe:** biopaliwa, algi, fotobioreaktory

### WSTĘP

Algi (glony) są grupą organizmów plechowych, najczęściej samożywnych, żyjących w środowisku wodnym lub miejscach wilgotnych. Ciało alg stanowi jednorodną lub zbudowaną z mało zróżnicowanych komórek plecha, o wielkości od kilku mikrometrów do kilku metrów. Plecha może przybierać kształt przypominający liście lub łodygi. Służą one do pochłaniania pokarmu z otoczenia. Organizmy te występują w wodach słodkich, słonych, chłodnych i ciepłych. Żyją one we wszystkich strefach geograficznych, ale najliczniej występują na półkuli północnej, gdzie rocznie wydobywa się ich ok. 1,5 mln t. Do najczęściej wydobywanych i wykorzystywanych alg należą:

- zielenice – zawierające zielony chlorofil, żółty ksantofil i pomarańczowy karoten,

- krasnorosty – z czerwoną fikoerytryną, niebieską fikocyjaniną i zielonym chlorofilem,
- brunatnice – z ciałkami barwnikowymi wypełnionymi, obok chlorofilu i ksantofili, brunatną fukoksantyną.

Najszerze wykorzystanie znalazły te glony w niektórych krajach azjatyckich, głównie jako składnik pokarmu dla ludzi i zwierząt oraz jako nawóz dla rolnictwa. W większości krajów wysoko rozwiniętych ten sposób wykorzystania glonów wciąż jest traktowany z rezerwą. Algi, które dostarczają wielu cennych związków chemicznych, znalazły zastosowanie przede wszystkim w przemyśle kosmetycznym i farmaceutycznym. Otrzymywane są z nich ekstrakty i mączki. Ekstrakty wykorzystywane są zwykle w kremach, tonikach i szamponach. Mączki natomiast stosuje się w maseczkach i kąpielach wyszczuplających. Jednak już wkrótce może okazać się, że ten wcale niemały zakres zastosowań glonów zostanie znacznie powiększony, jeżeli potwierdzą się nadzieje ich wykorzystania w energetyce i przemyśle (produkcja biomasy na cele energetyczne oraz produkcja biodiesla).

W aspekcie paliw alternatywnych mikroalgi są miniaturowymi biologicznymi fabrykami, które w procesie fotosyntezy przekształcają dwutlenek węgla i światło słoneczne w bogatą w składniki mineralne biomasę (Banerjee i in. 2002, Melis 2002, Lorenz i Cysewski 2003, Spolaore i in. 2006). Dodatkowo te fotosyntetyzujące mikroorganizmy są użyteczne w bioremediacji środowisk zanieczyszczonych (Kalin i in. 2005, Munoz i Guieysse 2006) i odgrywają ważną rolę jako „biona-wozy”, poprzez wiązanie azotu atmosferycznego (Vaishampayan i in. 2001).

Mikroalgi mogą być wykorzystywane do produkcji różnych typów nośników energii. Należą do nich:

- biometan produkowany przez beztlenowe trawienie biomasy glonów (Spolaore i in. 2006),
- biodiesel powstający z oleju pozyskanego z alg (Banerjee i in. 2002, Gavrilescu i Chisti 2005, Roessler i in. 1994),
- biowodór produkowany fotobiologicznie (Fedorov i in. 2005, Ghirardi i in. 2000, Kapdan i Kargi 2006, Melis 2002).

Pomysł użycia mikroalg jako źródła paliwa nie jest nowy (Chisti 1980, Nagle i Lemke 1990), ale obecnie, w „świecie” paliw alternatywnych, biopaliwa z alg cieszą się coraz większym zainteresowaniem. Hodowla alg na cele energetyczne zmniejsza zagrożenie globalnego ocieplenia, ponieważ wpływa na zmniejszenie zużycia paliw kopalnianych oraz wykorzystuje znaczne ilości CO<sub>2</sub> na swoją produkcję (Gavrilescu i Chisti 2005).

## PRODUKCJA BIOMASY Z MIKROALG

Produkcja biomasy z alg jest bardziej skomplikowana niż uprawa tych roślin. Ich wzrost wymaga światła, dwutlenku węgla, wody i soli mineralnych. Temperatura, w której hodowane są glony musi oscylować w granicach 20-30°C. W celu zminimalizowania kosztów wytwarzania biomasy, jej produkcja powinna opierać się o łatwo dostępne światło słoneczne. Podłoża do wzrostu alg muszą dostarczać składników mineralnych, których wymagają komórki glonów. Głównie chodzi o takie pierwiastki jak: azot, fosfor, żelazo i w pewnych przypadkach krzem. Minimalne wymagania pokarmowe muszą być określone z wykorzystaniem odpowiedniej formuły cząsteczkowej biomasy mikroorganizmów, która jest następująca:  $CO_0,48H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01}$ . Formuła ta została opracowana przez Grobbelaar (2004). Biogeny, takie jak fosfor muszą być dostarczone w istotnym nadmiarze. Fosfor tworzy kompleksy z jonami żelaza i po dodaniu do podłoża nie jest w całości dostępny dla mikroorganizmów. Podłoża do hodowli alg nie mogą być zbyt drogie, dlatego powszechnie używana jest woda morska bogata w naturalne związki fosforu i azotu oraz inne mikroelementy (Molina Grima i n. 1999).

Biomasa glonów zawiera średnio 50% węgla w suchej masie. Pochodzi on z dwutlenku węgla niezbędnego do wzrostu alg (Sanchez Miron i in. 2003). Na wytworzenie 100 Mg biomasy algi potrzebują około 183 Mg  $CO_2$ . Zaletą produkcji biodiesla z alg jest fakt, że mikroorganizmy te absorbują i przetwarzają dwutlenek węgla, a także inne substancje emitowane do atmosfery. Poza tym do ich rozwoju niezbędne są azotany i fosforany, co często przyczynia się do ochrony środowiska przed nadmierną ich ilością. Rozwój produkcji alg w pobliżu elektrowni węglowych, które emitują do atmosfery duże ilości  $CO_2$  lub też oczyszczalni ścieków, chlewni czy ferm drobiu mógłby przyczynić się do rozwiązania dwóch kolejnych problemów współczesnego świata – zanieczyszczenia atmosfery i środowiska glebowego (Chisti 2007).

Produkcja biomasy z alg na dużą skalę zwykle prowadzona jest w hodowli ciągłej i dlatego niezbędne jest dostarczenie światła sztucznego. W tej metodzie świeże podłoże hodowlane jest szczepione stałą dawką zawiesiny mikroalg, która musi być ciągle mieszana, aby zapobiegać opadaniu biomasy (Molina Grima i in. 1999).

Praktyczne metody hodowli mikroalg na dużą skalę, to stawy na otwartym powietrzu (Molina Grima 1999) i fotobioreaktory (Sanchez Miron i in. 1999). Staw do hodowli alg jest zbudowany w formie zamkniętej pętli recyrkulacyjnej tworzącej kanał o głębokości około 0,3 m. Mieszanie i cyrkulację zapewnia turbina wprowadzająca zawiesinę w ruch. Turbina pracuje ciągle zapobiegając sedimentacji glonów. Biomasa glonów jest odprowadzana za turbiną na końcu pętli recyrkulacyjnej. Stawy są wyłożone białym plastikiem. Stawy takie są mniej

kosztowne w budowie i utrzymaniu niż fotobioreaktory, jednak produkcja biomasy jest w tych warunkach znacznie niższa niż w fotobioreaktorach (Chisti 2007).

Fotobioreaktory umożliwiają produkcję dużej ilości biomasy. Są zbudowane z materiału przepuszczającego światło i pozwalają na hodowlę dokładnie pożądanego gatunku mikroalg (Carvalho i in. 2006, Molina Grima 1999, Pulz 2001). Generalnie wyróżnia się 3 typy fotobioreaktorów:

- pionowo – kolumnowe,
- cylindryczne,
- płaskie czyli panelowe.

Światło jest podstawowym parametrem warunkującym wzrost mikroalg. Wymagają one kontrolowanego dostępu światła, które zwykle jest światłem słonecznym, ale może być zastąpione innymi sztucznymi źródłami. Wewnątrz fotobioreaktora wyróżnić można strefę jasną – blisko źródła światła oraz strefę ciemną – daleko od naświetlanej powierzchni. Obecność strefy zmroku jest spowodowana absorpcją światła przez mikroorganizmy i ich samozacienianiem. Takie zjawisko powoduje tworzenie się w reaktorze:

- zewnętrznej warstwy glonów narażonej na zbyt duże natężenia światła, które może powodować fotoinhibicję;
- środkowej warstwy o idealnym oświetleniu;
- wewnętrznej warstwy glonów z brakiem światła, gdzie procesy oddychania przebiegają z dużą intensywnością (Molina Grima i in. 1999, 2001).

Aby zapewnić algom właściwe warunki świetlne, w niektórych bioreaktorach używane są specjalne panele emitujące światło w zakresie czerwieni. Odpowiednia pozycja źródła światła, a także odpowiednia hydrodynamika gazowocieczowa wpływają zarówno na wzrost mikroorganizmów, jak i produkcję biomasy (Sanchez Miron i in. 1999). W fotobioreaktorach ważne jest także tempo aeracji lub cyrkulacji medium. Łącząc stosowną geometrię naświetlania z cyrkulacją medium możemy sprawić, że komórki będą krążyły między strefą świetlną i strefą zmroku reaktora w pewnej częstotliwości i regularnych odstępach (Molina Grima i in. 2000, 2001).

Sedymentacja biomasy w fotobioreaktorach jest ograniczona przez ciągły burzliwy przepływ, spowodowany pompami mechanicznymi lub napowietrzającymi. Pompy mechaniczne mogą powodować uszkodzenia biomasy (Chisti 1999, Sanchez Miron i in. 2003), ale są łatwe w instalacji i obsłudze. Pompy napowietrzające nie są zbyt chętnie używane, wymagają odpowiedniej obsługi i okresowego czyszczenia i dezynfekcji bioreaktora (Chisti 1999). Mieszanie w wyniku wdmuchiwania powietrza na spodzie reaktora przyczynia się do wymiany gazów i wyrównania temperatury w wysokoburzliwej przestrzeni górnej (Molina Grima i in. 1999, 2000).

W procesie fotosyntezy powstaje tlen. W typowym rurowym fotobioreaktorze maksymalna ilość wydzielonego tlenu może wynosić ok.  $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Zbyt wysoki poziom rozpuszczonego tlenu hamuje fotosyntezę oraz powoduje reakcję fotoutleniania, co prowadzi do uszkodzenia komórek glonów (Molina Grima i in. 2001). Zawiesina przemieszczająca się w fotobioreaktorze zużywa  $\text{CO}_2$ , co prowadzi do wzrostu pH (Camacho Rubio i in. 1999). Czasami konieczne jest wprowadzenie dwutlenku węgla przez iniekcję, aby zapobiec zbyt wysokiemu wzrostowi pH (Molina Grima i in. 1999). Kolejnym problemem są straty biomasy spowodowane oddychaniem organizmów w ciągu nocy. Straty te mogłyby być zredukowane poprzez kontrolowane obniżenie temperatury w fotobioreaktorze (Chisti 2007).

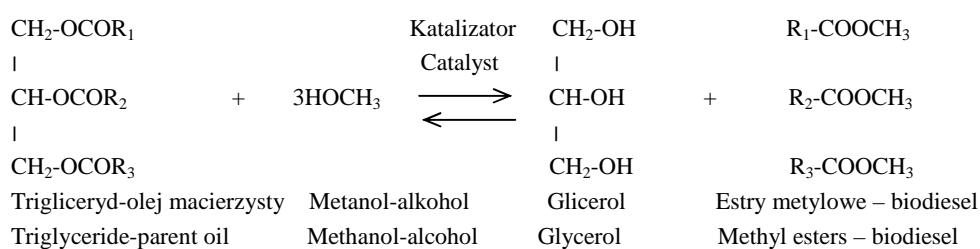
Wybór odpowiedniej metody produkcji glonów przeznaczonych zarówno do produkcji biodiesla, jak i biomasy wymaga porównania obu omówionych metod, tj. stawów i fotobioreaktorów. Z obliczeń wynika, że obie te metody są porównywalne zarówno co do poziomu produkcji biomasy, jak i zużycia  $\text{CO}_2$ . Jednak hodowla alg w fotobioreaktorach prowadzi do uzyskania większej ilości oleju (o ok. 1/3) w porównaniu do hodowli w stawach (Molina Grima 1999, Lorenz i Cysewski 2003, Spolaore i in. 2006).

Oddzielanie biomasy z zawiesiny hodowlanej może przebiegać poprzez jej filtrację lub wirowanie (Molina Grima i in. 2003).

#### TRANSESTRYFIKACJA OLEJU

Produkcja biodiesla, jak dotąd, oparta jest głównie na tłuszczach pochodzących z roślin oraz zwierząt. Produkcja oleju z alg (na skalę przemysłową) jest natomiast sprawą niedalekiej przyszłości (Chisti 2007). Biodiesel jest paliwem sprawdzonym, a technologia produkcji i użycia biopaliwa jest znana od ponad 50 lat (Barnwal i Sharma 2005, Felizardo i in. 2006, Knothe i in. 1997, Meher i in. 2006). Obecnie biodiesel jest produkowany głównie z soi, rzepaku i oleju palmowego, czyli roślin przeznaczonych do konsumpcji (Felizardo i in. 2006). Typowy proces komercyjnej produkcji biodiesla przebiega w kilku etapach. Olej macierzysty używany do produkcji biodiesla składa się z triglicerydów (rys. 1), w których 3 cząsteczki kwasu tłuszczowego są zestryfikowane przez cząsteczki glicerolu. W produkcji biodiesla triglicerydy wchodzi w reakcję z metanolem. W wyniku tej transestryfikacji powstają estry metylowe kwasów tłuszczowych, czyli biodiesel i glicerol jako produkt odpadowy. Reakcja przebiega etapowo: triglicerydy są najpierw przekształcane do dwuglicerydów, później do monoglicerydów, a następnie do glicerolu. Zgodnie z zapisem stechiometrycznym reakcji, poddając metanolizie 1 mol triacyloglicerolu zużywa się 3 mole alkoholu metylowego i otrzymuje się 3 mole estrów metylowych kwasów tłuszczowych i 1 mol glicero-

lu. Ponieważ reakcja metanolizy jest reakcją równowagową należy zastosować nadmiar jednego z substratów (zwykle alkoholu) lub przeprowadzać reakcję etapami, odbierając po każdym etapie produkt uboczny (glicerol) (Chisti 2007). W procesie przemysłowym używa się 6 moli metanolu dla każdego mola triglicerydu (Fukuda i in. 2001). Tak duży nadmiar metanolu gwarantuje, że reakcja przesunie się w kierunku estrów metylowych, tzn. w stronę biodiesla. Ilość estrów metylowych przekracza w tych warunkach 98% wagi bazowej (Fukuda i in. 2001).



**Rys. 1.** Transestryfikacja oleju do biodiesla. R1-R3 – grupy wodorowęglowe

**Fig. 1.** Transestrification of oil to biodiesel. R1-R3 – hydrocarbon groups

Transestryfikacja jest katalizowana przez kwasy, zasady (Fukuda i in. 2001, Meher i in. 2006) i enzymy lipolityczne (Sharma i in. 2001). Kataliza zasadowa transestryfikacji jest około 4000 razy szybsza niż reakcja katalizowana przez kwasy. Powszechnie używanymi katalizatorami zasadowymi są wodorotlenek sodu i potasu w stężeniu 1% w stosunku do wagi oleju. Oczywiście można do tego celu wykorzystać enzymy lipolityczne, jednak obecnie metoda ta nie jest stosowana z powodu relatywnie wysokich kosztów katalizy (Fukuda i in. 2001). W praktyce przemysłowej proces transestryfikacji prowadzi się najczęściej w temperaturze 60-70°C w obecności katalizatora zasadowego. W celu osiągnięcia wysokiego stopnia konwersji estrów (triacylogliceroli) stosuje się duży nadmiar metanolu, który po zakończeniu procesu transestryfikacji oddestylowuje się i zwraca do procesu. W tych warunkach reakcja przebiega około 90 minut. Wyższa temperatura może być używana przy wyższym ciśnieniu, ale jest to proces kosztowny. Olej używany do reakcji metanolizy musi spełniać określone wymagania, a w szczególności powinien być dokładnie osuszony i pozbawiony wolnych kwasów tłuszczowych powodujących powstawanie mydeł, które zmniejszają ilość katalizatora i powodują problemy z oddzieleniem frakcji glicerynowej i estrowej. Z uwagi na trudną rozpuszczalność metanolu w oleju, a stosunkowo łatwą w fazie wodnej, ważne jest energiczne mieszanie układu reakcyjnego, zwłaszcza w początkowej fazie reakcji, co powoduje zwiększenie kontaktu alkoholu z triacyloglicerolem (Chisti 2007).

Przyszłe procesy produkcji biodiesla z alg będą mogły być oparte na podobnych zasadach. Produkcja estrów metylowych czy biodiesla z oleju pochodzącego z glonów jest przedstawiona w pracy Belarbi i in. (2000), chociaż produkt finalny był przeznaczony do wykorzystania w przemyśle farmaceutycznym. Proces ten przebiegał etapowo, tj. ekstrakcja-transestryfikacja kwasów tłuszczowych z biomasy glonów, a następnie frakcjonowanie na kolumnach chromatograficznych (Belarbi i in. 2000).

#### POTENCJALNE UŻYCIE BIODIESLA Z MIKROALG

Obecnie w Stanach Zjednoczonych zużywa się ok. 530 mln m<sup>3</sup> biodiesla rocznie. Aby zastąpić olej kopalniany olejem roślinnym należało by obsiać 111 mln ha roślinami oleistymi (Chisti 2007). W Polsce, szacuje się, że w 2010 roku konsumpcja paliw wyniesie nawet 20 mln ton. Jest to 30% więcej niż w 2004 roku. Szczególnie duży wzrost zużycia będzie obserwowany w przypadku oleju napędowego, który jest paliwem dla silników z zapłonem samoczynnym (Diesla), a te są podstawą ciężkiego transportu. Stale rosnący popyt na paliwa płynne spowoduje wzrost zapotrzebowania na ropę naftową, co może wywoływać stały wzrost jej cen. Dodatkowym problemem jest fakt, że większość zasobów ropy naftowej występuje w krajach dzisiaj niestabilnych politycznie, co nie gwarantuje stałych dostaw. Koniecznością staje się więc poszukiwanie nowych rodzajów paliw – paliw alternatywnych, które ze względu na niższą cenę lub mniejszą emisję toksycznych składników gazów spalinowych, mogą w perspektywie być zamiennikami produktów pochodzących z ropy naftowej. Można do nich zaliczyć paliwa ciekłe (biodiesel i bioetylina) i gazowe (biometan), pochodzące z biomasy, a także biowodór stosując jej zgazowanie. Biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji. Mogą one pochodzić z produktów, odpadów, jak również z pozostałości po produkcji rolnej oraz leśnej, a także z przemysłu przetwarzającego te produkty. W ostatnim czasie dużym zainteresowaniem cieszy się również bioenergia pochodząca ze spalania lub przetwarzania alg (Felizardo i in. 2006).

W tabeli 1 zestawiono niektóre rośliny wykorzystywane do produkcji biodiesla wraz z powierzchnią zasiewów wymaganą do pokrycia prognozowanego zapotrzebowania. Ilość oleju uzyskanego z mikroalg podana w tabeli 1 oparta jest na wynikach badań eksperymentalnych, dotyczących produktywności biomasy w fotobioreaktorach (Chisti 2007). W tabeli 1 algi pojawiają się jako jedno ze źródeł biodiesla i całkowicie dyskwalifikują paliwa pochodzenia organicznego. W przeciwieństwie do roślin oleistych mikroalgi wzrastają ekstremalnie szybko

i są znacznie bardziej bogate w olej. Mikroalgi powszechnie podwajają swoją biomasę w ciągu 24 godzin. Czas podwajania biomasy podczas wzrostu eksperymentalnego, w odpowiednich warunkach jest tak krótki, że wynosi zaledwie 3,5 godziny. Natomiast poziom oleju w algach może przekroczyć 80% suchej masy (Spolaore i in. 2006). Z tych powodów hodowla alg może być nieograniczonym źródłem wysokotłuszczowej biomasy.

Algi produkują wiele różnych rodzajów lipidów, węglowodorów i innych związków kompleksowych i nie każdy gatunek jest odpowiedni do produkcji biodiesla (Banerjee i in. 2002, Guschina i Harwood 2006). Zaletą użycia alg do produkcji biopaliwa jest to, że nie stanowią one konkurencji na rynku produktów spożywczych. Można również u nich znacznie swobodniej wprowadzać modyfikacje genetyczne znacznie zwiększające wydajność oleju (Chisti 2007).

**Tabela 1.** Porównanie produkcji wybranych „roślin energetycznych” (w zależności od ich zaolejenia), która może zaspokoić 50% całego zapotrzebowania w paliwa transportowe USA (Chisti 2007)  
**Table 1.** Comparison of some sources of biodiesel for meeting 50% of all transport fuel needs of USA (Chisti 2007)

Uprawa – Crop	Ilość oleju – Oil yield (L·ha <sup>-1</sup> )	Niezbędny obszar Land area needed (Mha)
Kukurydza – Corn	172	1540
Soja – Soybean	446	594
Kokos – Coconut	2689	99
Olej palmowy – Oil palm	5950	45
Mikroalgi – Microalgae <sup>a</sup>	136,900	2
Mikroalgi – Microalgae <sup>b</sup>	58,700	4,5

<sup>a</sup> 70% oleju w biomacie – 70% of oil in biomass, <sup>b</sup> 30% oleju w biomacie – 30% of oil in biomass.

Produktywność oleju uzyskanego z glonów zależy od tempa ich wzrostu oraz od poziomu zaolejenia biomasy. Mikroalgi charakteryzujące się dużą produktywnością oleju są szczególnie pożądane do wytwarzania biodiesla. Różne gatunki glonów zawierających w plesze od 20 do 50% oleju przedstawiono w tabeli 2.

Potencjalnie, zamiast mikroalg, olej mógłby być także produkowany przez heterotroficzne mikroorganizmy, wzrastające na naturalnych źródłach węgla organicznego (Ratlidge i Wynn 2002). Jednak mikroorganizmy te nie są tak wydajne jak użycie fotosyntetyzujących mikroalg.



**Tabela 2.** Poziom oleju w wybranych mikroalgach (Chisti 2007)  
**Table 2.** Oil content of some microalgae (Chisti 2007)

Mikroalgi – Microalgae	Poziom oleju – Oil content (% s.m.– dry wt)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella</i> sp.	28-32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris</i> sp.	20-35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia</i> sp.	45-47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50-77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15-23

#### BIODIESEL Z MIKROALG – AKCEPTACJA, EKONOMIA

Aby biodiesel produkowany z mikroalg został zaakceptowany przez społeczeństwo musi spełniać powszechnie obowiązujące standardy.

Olej pozyskiwany z mikroalg bogaty jest w wielonienasycone kwasy tłuszczowe z 4 i więcej podwójnymi wiązaniami, a także takie kwasy, jak eikozapentaenowy i dekozapentaenowy. Estry metylowe kwasów tłuszczowych, jak również kwasy tłuszczowe zawierające w swoim łańcuch węglowym wiązania nienasycone ulegają przemianom tj. hydrolizie, autooksydacji czy polimeryzacji. Magazynowanie biopaliw, niezależnie czy opartych na oleju pochodzącym z alg, czy z roślin, takich jak rzepak czy soja nastęrcza pewne trudności. Mianowicie przy dłuższym przechowywaniu można zaobserwować rozwój drobnoustrojów i tworzenie substancji szlamowych. Sprawia to, że zmieniają one lepkość i mogą odkładać się w cysternach przechowalniczych, a także w zbiornikach samochodowych. Z tych też względów dłuższe magazynowanie biopaliw jest niemożliwe (Belarbi i in. 2000, Chisti 2007).

W celu poprawy ekonomii produkcji biodiesla z mikroalg może być wykorzystana inżynieria genetyczna (Dunahay i in. 1996, Roessler i in. 1994). Inżynieria genetyczna mogłaby być potencjalnie wykorzystana do:

- wzrostu efektywności procesu fotosyntezy, aby umożliwić wzrost produkcji biomasy,
- poprawy szybkości namnażania mikroorganizmów,
- wzrostu poziomu oleju w biomacie,
- poprawy tolerancji temperaturowej mikroorganizmów, aby ograniczyć straty spowodowane spadkami temperatury,
- zmniejszenia fotoinhibicji,
- zmniejszenia wrażliwości na fotoutlenianie, które powoduje niszczenie komórek (Chisti 2007, Zhang i in. 1996).

#### PODSUMOWANIE

Z przedstawionego przeglądu literatury wynika, że produkcja biodiesla z mikroalg jest możliwa. Jednak poprawy wymaga ekonomia produkcji tego biopaliwa, w związku z bardzo wysokimi kosztami produkcji. Produkcja „niskocenowego” biodiesla z mikroalg wymaga ingerencji w biologię tych mikroorganizmów na drodze inżynierii genetycznej i metabolicznej.

#### PIŚMIENNICTWO

- Banerjee A., Sharma R., Chisti Y., Banerjee U.C., 2002. Botryococcus braunii: a renewable source of hydrocarbons and other chemicals. *Crit. Rev. Biotechnol.*, 22, 245-279.
- Barnwal B.K., Sharma M.P., 2005. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 9, 363-378.
- Belarbi E.H., Molina Grima E., Chisti Y., 2000. A process for high yield and scaleable recovery of high purity eicosapentaenoic acid esters from microalgae and fish oil. *Enzyme Microb. Technol.*, 26, 516-529.
- 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.
- 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.
- Chisti Y., 1980. An unusual hydrocarbon. *J. Remy. Soc.*, 81, 27-28.
- Chisti Y., 1999. Shear sensitivity. In: *Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis and bioseparation* (Eds M.C., Flickinger, S.W. Drew). Wiley, 5, 2379-2406.
- Chisti Y., Biodiesle from microalgae. 2007, *Biotechnol. Adv.*, 25, 294-306.
- Dunahay T.G., Jarvis E.E., Dais S.S., Roessler P.G., 1996. Manipulation of microalgal lipid production using genetic engineering. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 57, 223-231.

- Fedorov A.S., Kosourov S., Ghirardi M.L., Seibert M., 2005. Continuous H<sub>2</sub> photoproduction by *Chlamydomonas reinhardtii* using a novel two-stage, sulfate-limited chemostat system. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 121, 403-412.
- Felizardo P., Correia M.J.N., Raposo I., Mendes J.F., Berkemeier R., Bordado J.M., 2006. Production of biodiesel from waste frying oil. *Waste Manag.*, 26, 487-494.
- Fukuda H., Kondo A., Noda H., 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *J. Biosci. Bioeng.*, 92, 405-416.
- Gavrilescu M., Chisti Y., 2005. Biotechnology – a sustainable alternative for chemical industry. *Biotechnol. Adv.*, 23, 477-499.
- Ghirardi M.L., Zhang J.P., Lee J.W., Flynn T., Seiber M., Greenbaum E., 2000. Microalgae: a green source of renewable H<sub>2</sub>. *Trends Biotechnol.*, 18, 506-511.
- Grobbelaar J.U., 2004. Algal nutrition. In: *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology* (Eds A. Richmond). Blackwell, 97-115.
- Guschina I.A., Harwood J.L., 2006. Lipids and lipid metabolism in eucaryotic algae. *Prog. Lipid Res.*, 45, 160-186.
- Kalin M., Wheeler W.N., Meinrath G., 2005. The removal of uranium from mining waste water using algal/microalgal biomass. *J. Environ. Radioact.*, 78, 151-177.
- Kapdan I.K., Kargi F., 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzym. Microb. Technol.*, 38, 569-582.
- Knothe G., Dunn R.O., Bagby M.O., 1997. Biodiesel: the use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels. *ACS Symp. Ser.*, 666, 172-208.
- Lorenz R.T., Cysewski G.R., 2003. Commercial potential for *Haematococcus* microalga as a natural source of astaxanthin. *Trends Biotechnol.*, 18, 160-167.
- Meher L.C., Vidya Sagar D., Naik S.N., 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 10, 248-268.
- Melis A., 2002. Green alga hydrogen production: progress, challenges and prospects. *Int. J. Hydrogen Energy*, 27, 1217-1228.
- Molina Grima E., 1999. Microalgae, mass culture methods. In: *Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis and bioseparation* (Eds M.C., Flickinger, S.W. Drew). Wiley, 5, 1753-1769.
- 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., Acien Fernandez F.G., Garcia Camacho F., Camacho Rubio F., Chisti Y., 2000. Scale-up of tubular photobioreactors. *J. Appl. Phycol.*, 12, 355-368.
- Molina Grima E., Fernandez J., Acien Fernandez F.G., Chisti Y., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *J. Biotechnol.*, 92, 113-131.
- Molina Grima E., Belarbi E.H., Acien Fernandez F.G., Robles Medina A., Chisti Y., 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process, options and economics. *Biotechnol. Adv.*, 20, 491-515.
- Munoz R., Guieysse B., 2006. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Res.*, 40, 2799-2815.
- Nagle N., Lemke P., 1990. Production of methyl-ester fuel from microalgae. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 24, 255-261.
- Pulz O., 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57, 287-293.
- Ratledge C., Wynn J.P., 2002. The biochemistry and molecular biology of lipid accumulation in oleaginous microorganisms. *Adv. Appl. Microbiol.*, 51, 1-51.

- Roessler P.G., Brown L.M., Dunahay T.G., Heacox D.A., Jarvis E.E., Schneider J.C., 1994. Genetic-engineering approaches for enhanced production of biodiesel fuel from microalgae. ACS Symp. Ser., 566, 255-270.
- 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 tricoratum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. Biochem. Eng. J., 16, 287-297.
- Sharma R., Chisti Y., Banerjee U.C., 2001. Production, purification, characterization and applications of lipases. Biotechnol. Adv., 19, 627-662.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A., 2006. Commercial applications of microalgae. J. Biosci. Bioeng. 101, 87-96.
- Vaishampayan A., Sinha R.P., Hader D.P., Dey T., Gupta A.K., Bhan U., 2001. Cyanobacterial biofertilizers in rice agriculture. Bot. Rev., 67, 453-516.
- Zhang Z., Moo-Young M., Chisti Y., 1996. Plasmid stability in recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. Biotechnol. Adv., 14, 401-435.

#### ALGAE – ENERGY FOR THE FUTURE (BIOMASS, BIODIESEL): a review

*Magdalena Frąc<sup>1</sup>, Stefania Jezierska-Tys<sup>2</sup>, Jerzy Tys<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin  
e-mail: m.frac@ipan.lublin.pl

<sup>2</sup>Department of Agricultural Microbiology University of Life Sciences  
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin

**Abstract.** Microalgae can provide several different types of renewable biofuels. These include methane produced by anaerobic digestion of algal biomass, biodiesel derived from microalgal oil, and photobiologically produced biohydrogen. The idea of using microalgae as a source of fuel is not new, but it is being taken seriously because of the escalating price of petroleum. In this paper we present some possibilities of biodiesel production from microalgae. There is presented the production of microalgal biomass in photobioreactors and transformation of their biomass into biodiesel.

**Key words:** biofuels, algae, photobioreactors