

Wojciech Dąbrowski, Włodzimierz Bednarski

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
wojciech.dabrowski@uwm.edu.pl

PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA OLEJU Z ALG W PRODUKCJI BIODIESLA

Streszczenie: Odnawialne źródła energii stanowią alternatywę dla wielu państw wobec wyczerpujących się zasobów ropy naftowej, wymogów ochrony środowiska oraz uniezależnienia się od zewnętrznych dostawców energii. Obecnie produkcja biodiesla pierwszej generacji zmaga się z problemem niewystarczającej ilości oleju roślinnego i ograniczonego arealu upraw. Alternatywą mogą być olejobodne mikroorganizmy, których produktywność setki razy przekracza produktywność roślin. W opracowaniu przedstawiono potencjalne możliwości syntezy lipidów przez mikroalgi oraz wykorzystania oleju z alg w przemysłowej produkcji biodiesla. Zwrócono uwagę na unikalne cechy biochemiczne mikroalg, systemy produkcji biomasy oraz właściwości otrzymanego oleju i biodiesla.

Słowa kluczowe: algi, oleje, biodiesel.

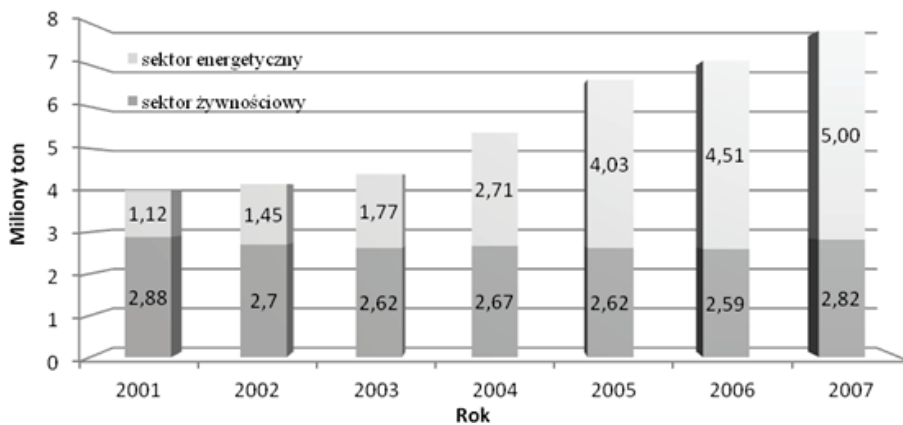
1. Wstęp

Rozwój i wdrażanie technologii odnawialnych źródeł energii jest promowane przez wiele krajów na świecie, szczególnie przez kraje Unii Europejskiej. Idea pozyskiwania paliw z biomasy znakomicie komponuje się z działaniami mającymi na celu ograniczenie efektu cieplarnianego, niezależność energetyczną oraz rozwój sektora rolniczego [Bryan i in. 2010]. Produkcja biopaliw w ciągu ostatniej dekady zwiększyła się 8-krotnie, głównie w związku z rosnącym popytem na bioetanol i biodiesel [World Energy Outlook 2010].

Biodiesel, definiowany jako estry alkilowe kwasów tłuszczowych, powstaje podczas reakcji transestryfikacji olejów roślinnych lub tłuszczów zwierzęcych z krótkołańcuchowym alkoholem, najczęściej metanolem. Ze względu na naturalne pochodzenie i pożądane właściwości jest powszechnie postrzegany jako zamiennik oleju napędowego. Zaletami stosowania estrów metylowych kwasów tłuszczowych są: bezpieczeństwo użytkowania i przechowywania, obniżona emisja CO, CO₂, NO_x, SO_x, węglowodorów i cząstek stałych w spalinach oraz neutralny bilans obiegu węgla [Fazal i in. 2011]. Biodiesel jest kompatybilny z silnikami Diesla, miesza się w dowolnym stosunku z olejem napędowym oraz polepsza jego spalanie [Nielsen i in. 2008].

Ostatnio opracowano wiele metod mających na celu uzyskanie maksymalnej konwersji oleju do odpowiadających bioestrów [Atabani i in. 2012]. Poznano i scharakteryzowano czynniki warunkujące efektywny przebieg procesu transestryfikacji i estryfikacji, dla katalizy zarówno chemicznej, jak i enzymatycznej [Szczęsna-Antczak i in. 2009]. Szczególny postęp dotyczy zastosowania lipaz w warunkach niewodnych, tj. w rozpuszczalnikach organicznych, cieczach jonowych czy gazach nadkrytycznych [Lai i in. 2012; Szczęsna-Antczak i in. 2009].

Obecnie największą przeszkodą w produkcji biodiesla staje się pozyskanie taniego, łatwo dostępnego i zapewniającego ciągłość dostaw surowca tłuszczowego. Biodiesel pierwszej generacji wytwarzany jest z surowców roślinnych, takich jak olej sojowy, palmowy, rzepakowy, słonecznikowy, nasiona bawełny [Santori i in. 2012]. Rosnący popyt na bioestry stale zwiększa zapotrzebowane na surowce oleiste. Ograniczone możliwości plonowania roślin rekompensowane są przez zwiększanie arealów upraw. Działania te są bezpośrednią przyczyną wypierania produkcji żywności z gruntów rolnych na rzecz produkcji biodiesla – rys. 1 [Gołaszewski 2009]. Pośrednimi konsekwencjami są: wzrost cen olejów jadalnych i żywności, wzrost zużycia wody, nawozów i środków chemicznych, zanieczyszczenie wody i ziemi, spadek bioróżnorodności przez wprowadzenie monokultur, wykorzystanie bogatych ekologicznie obszarów jako pól uprawnych (wycinanie lasów równikowych pod plantacje palm) [Bryan i in. 2010].



Rys. 1. Zużycie oleju rzepakowego w UE 27 w latach 2001–2007

Źródło: [Gołaszewski 2009].

Biodiesel drugiej generacji, otrzymywany z olejów roślin niejadalnych oraz olejów posmazalnicych i odpadowych tłuszczów zwierzęcych, jest znakomitym sposobem utylizacji tłuszczowych odpadów przemysłu spożywczego. Jednak ilość oraz jakość tych odpadów jest zarówno niewystarczająca, jak i niezadowalająca [Balat 2011].

Obiecującym i odnawialnym źródłem użytecznych triacylogliceroli, wykluczającym współzawodnictwo z roślinami uprawnymi oraz zdolnym sprostać globalnym potrzebom produkcyjnym, są autotroficzne mikroalgi. Są to mikroskopijne, jednokomórkowe, prokariotyczne (cyjanobakterie) lub eukariotyczne organizmy żyjące w wodach słonych i słodkich [Demirbas, Demirbas 2011; Scott i in. 2010]. Oprócz CO₂, światła i wody mikroalgi wymagają jedynie prostego źródła azotu (amoniaku, azotanów) oraz niektórych pierwiastków, takich jak P, K, Mg, Fe, S [Ratledge, Cohen 2008]. Mikroalgi wykorzystuje się w remediacji wody, gleby i powietrza [Olguin 2003; Rawat i in. 2011]. Duży potencjał biologiczny oraz właściwości mikroalg zdecydowały o ich przemysłowym zastosowaniu. Badania dotyczące produkcji oleju z alg realizowane były już latach 70., lecz niska cena ropy naftowej uniemożliwiła komercyjne zastosowanie [Taberero i in. 2012]. Z mikroalg otrzymuje się dodatkowo metan [Alzate i in. 2012], etanol [Liao i in. 2010], biowodór [Fedorov i in. 2005; Kapdan, Kargi 2006], poza tym pasze, nawozy oraz cenne związki bioaktywne (β-karoten, wielonienasycone kwasy tłuszczowe) i inne [Christi 2007]. Wiele gatunków i szczepów dostępnych jest w kolekcjach na całym świecie, m.in. w Portugalii (University of Coimbra), Niemczech (Göttingen University), USA (University of Texas), Japonii (National Institute for Environmental Studies, NIES), Australii (The CISRO Collection of Living Microalgae, CCLM) [Mata i in. 2010].

Celem pracy jest przekazanie bieżących informacji o możliwościach wydajnej syntezy lipidów przez olejodajne szczepy mikroalg oraz wykorzystanie oleju z alg w przemysłowej produkcji biodiesla z uwzględnieniem aspektów ekologicznych.

2. Potencjał mikroalg w produkcji oleju

Mikroalgi są porównywane do miniaturowych fabryk zdolnych do jednoczesnego namnażania biomasy i syntezy lipidów, głównie triacylogliceroli, ponieważ ich wydajność znacznie przewyższa wydajność produkcji roślinnej [Rodolfi i in. 2009]. Podwojenie biomasy mikroalg następuje w ciągu 24 godzin, natomiast w fazie wzrostu wykładniczego czas ten wynosi jedynie 3,5 godziny. Zawartość oleju w suchej masie komórki dla niektórych szczepów może przekraczać 80%, jednak zwykle mieści się w przedziale 20–50% [Christi 2007]. W praktyce nie jest możliwe uzyskanie maksymalnych wartości obu parametrów, dlatego zdolność szczepu do wydajnej syntezy oleju charakteryzuje produktywność lipidów, która jest funkcją obu zmiennych – tab. 1 [Rodolfi i in. 2009].

Obecnie uważa się, że mikroalgi stanowią alternatywę produkcji biodiesla pierwszej generacji. W przeciwieństwie do upraw zbóż, hodowla mikroalg nie stanowi konkurencji dla oleju spożywczego, nie wymaga dużych przestrzeni, wykorzystania pól uprawnych, jest mniej zależna od klimatu, pór roku, pogody. Cykl hodowli mikroalg trwa od 1 do 10 dni, dlatego zbiór biomasy może odbywać się kilkanaście razy w roku lub w sposób ciągły [Vyas i in. 2010]. Analiza porównawcza produkcji

Tabela 1. Produktywność biomasy oraz lipidów 30 szczepów mikroalg

Mikroalgi	Gatunek	Produktywność biomasy (g/L/d)	Zawartość lipidów (% s.m.)	Produktywność lipidów (mg/L/d)
Okrzemki	<i>Chaetoceros muelleri</i> F&M-M43	0,07	33,6	21,8
	<i>Chaetoceros calcitrans</i> CS 178	0,04	39,8	17,6
	<i>Phaeodactylum tricorutum</i> F&M-M 40	0,24	18,7	44,8
	<i>Skeletonoma costatum</i> CS 181	0,08	21,0	17,4
	<i>Skeletonoma</i> sp. CS 252	0,09	31,8	27,3
	<i>Thalassioria pseudonana</i> CS 173	0,08	20,6	17,4
	<i>Chlorella</i> sp. F&M-M48	0,23	18,7	42,1
	<i>Chlorella sorokiniana</i> IAM-212	0,23	19,3	44,7
	<i>Chlorella vulgaris</i> CCAP 211/11b	0,17	19,2	32,6
	<i>Chlorella vulgaris</i> F&M-M49	0,20	18,4	36,9
Zielone algi	<i>Chlorococcum</i> sp. UMACC 112	0,28	19,3	53,7
	<i>Scenedemus quadricauda</i>	0,19	18,4	35,1
	<i>Scenedemus</i> F&M-M19	0,21	19,6	40,8
	<i>Scenedemus</i> sp. DM	0,26	21,1	53,9
	<i>Tetraselmis suecica</i> F&M-M33	0,32	8,5	27,0
	<i>Tetraselmis</i> sp. F&M-M34	0,30	14,7	43,4
	<i>Tetraselmis suecica</i> F&M-M35	0,28	12,9	36,4
	<i>Ellipsoidion</i> sp. F&M-M31	0,17	27,4	47,3
	<i>Monodus subterraneus</i> UTEX 151	0,19	16,1	30,4
	<i>Nannochloropsis</i> sp. CS 246	0,17	29,2	49,7
Czerwone algi	<i>Porphyridium cruentum</i>	0,37	9,5	34,8
Inne	<i>Pavlova salina</i> CS 49	0,16	30,9	49,4
	<i>Pavlova lutheri</i> CS 182	0,14	35,5	50,2
	<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M24	0,18	30,9	54,8
	<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M26	0,21	29,6	61,0
	<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M27	0,20	24,4	48,2
	<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M28	0,17	35,7	60,9
	<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M29	0,17	21,6	37,6
	<i>Isochrysis</i> sp. [T-ISO] CS 177	0,17	22,4	37,7
	<i>Isochrysis</i> sp. F&M-M37	0,14	27,4	37,8

Źródło: [Rodolfi i in. 2009].

Tabela 2. Porównanie produktywności mikroalg z innymi surowcami olejnymi

Surowiec	Zawartość oleju (% w/w)	Wydajność oleju (L/ha/rok)	Wykorzystanie terenu (m ² /rok/kg biodiesla)	Produktywność biodiesla (kg/ha/rok)
Soja	18	636	18	562
Rzepak	41	974	12	862
Palma	36	5 366	2	4 747
Mikroalgi	30	58 700	0,2	51 927
	70	136 900	0,1	121 104

Źródło: [Christi 2007; Mata i in. 2010].

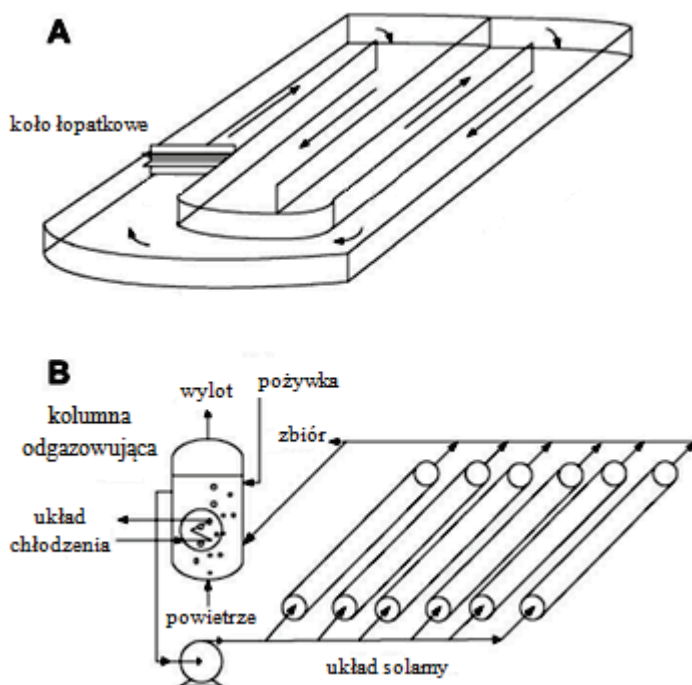
oleju z alg i powszechnie stosowanych surowców roślinnych wskazuje, że hodowla mikroalg zapewnia nawet od 15 do 300 lub 800 razy więcej oleju z hektara, odpowiednio przy zawartości 30 i 70% lipidów w komórce (tab. 2).

3. Produkcja biomasy mikroalg w skali przemysłowej

3.1. Produkcja fotoautotroficzna

Produkcja fotoautotroficzna jest jedyną przemysłową metodą hodowli mikroalg, która obecnie spełnia wymagania techniczne i ekonomiczne [Brennan, Owende 2010]. Najpowszechniej stosowane są stawy torowe (A) oraz rurowe fotobioreaktory (B) – rys. 2, tab. 3 [Christi 2007; Singh, Gu 2010].

W porównaniu z fotobioreaktorami stawy torowe są od 3 do 10 razy tańsze w obsłudze i utrzymaniu, wymagają niewielkiego wkładu energetycznego dzięki zastosowaniu nisko energochłonnych kół łopatkowych do mieszania i cyrkulacji hodowli [Jorquera i in. 2010]. Dodatkowo są wytrzymalsze, łatwe do czyszczenia, nie wymagają ciągłej kontroli [Brennan, Owende 2010]. Zdolności produkcyjne ograniczone są przez bariery techniczne, wynikające z otwartego systemu hodowli. Stawy torowe podatne są na zakażenia, wymagane więc są szczepy zdolne do szybkiego namnażania lub rozwijające się w ekstremalnych środowiskach, takie jak halofilna *Dunaliella salina* czy alkalofilna *Spirulina* [Borowitzka 1999; Jiménez i in. 2003; Jorquera i in. 2010]. Brak możliwości kontroli temperatury sprawia, że stawy torowe mogą być stosowane w określonych strefach klimatycznych, gdzie temperatura nie spada poniżej 15 °C. Brak chłodzenia powoduje odparowanie dużych ilości wody i zmiany składu jonowego medium, lecz zapobiega to przegrzaniu hodowli [Jorquera i in. 2010]. Dużym ograniczeniem jest nieefektywne oświetlenie wynikające z głębokości hodowli (15–30 cm). Wymagana temperatura i intensywność światła ograniczają okres hodowli do 9 miesięcy, nawet w najlepszych lokalizacjach na świecie [Ratledge, Cohen 2008].



Rys. 2. Schemat systemu produkcji biomasy mikroalg: (A) stawy torowe (kanałowe); (B) fotobioreaktor rurowy

Źródło: [Jorquera i in. 2010].

Fotobioreaktory (rurowe, płaskie lub kolumnowe oraz ich odmiany) to zamknięte systemy zaprojektowane do kontrolowanej produkcji biomasy [Singh, Sharma 2012]. Oddzielenie medium hodowlanego od środowiska zewnętrznego zapobiega zakażeniu, stratom CO_2 oraz parowaniu. Główną zaletą stosowania fotobioreaktorów jest wysoka produktywność objętościowa biomasy. Dla fotobioreaktorów rurowych jest ona 13 razy wyższa w porównaniu ze stawami torowymi [Christi 2007]. Wysoka efektywność systemów zamkniętych jest możliwa dzięki kontroli podstawowych parametrów hodowli (temperatury, pH, mieszania, stężenia CO_2 i O_2), lepszemu rozkładowi przestrzennemu CO_2 i O_2 [Briassoulis i in. 2010], 3–5 razy większemu stężeniu biomasy [Mata i in. 2010], wysokiemu stosunkowi powierzchni do objętości pozwalającemu na lepsze wykorzystanie światła słonecznego. Dodatkowo światło nie pada bezpośrednio na hodowlę, a głębokość penetracji jest zoptymalizowana przez odpowiednio dobraną grubość ścianek reaktora oraz medium [Briassoulis i in. 2010]. Fotobioreaktory to bardzo elastyczne konstrukcje pod względem możliwości dopasowania do cech biologicznych i fizjologicznych poszczególnych szczepów mikroalg, umożliwiające również hodowlę mniej uzależnioną od klimatu [Mata i in. 2010].

Największą wadą fotobioreaktorów jest ich zamknięty charakter. Pod wpływem dużego nasświetlenia maksymalna produkcja tlenu w fotobioreaktorze rurowym osiąga wartość 10 g O₂/m³/min. Wysokie stężenie rozpuszczonego tlenu w kombinacji z intensywnym oświetleniem powoduje fotooksydacyjne niszczenie komórek [Christi 2007]. Wymusza to ograniczenie długości rur do 80 m oraz stosowanie stref odgazowania [Christi 2007]. Wyższe stężenie biomasy ogranicza także średnicę rur, tak aby promienie świetlne docierały do wnętrza hodowli. Z kolei cechami fotobioreaktorów kolumnowych są obniżone fotoinhibicja i fotooksydacja, ale mała powierzchnia oświetlenia [Brennan, Owende 2010]. Zamknięty charakter powoduje także przegrzewanie, zarastanie i zapychanie (*bio-fouling*), trudności w powiększaniu skali, wyższe zużycie energii na mieszanie [Jorquera i in. 2010] oraz niszczenie komórek przez siły ścinające [Mata i in. 2010]. Nakład inwestycyjny dla fotobioreaktorów jest około dziesięć razy większy niż dla otwartych stawów [Alabi i in. 2009].

Tabela 3. Porównanie systemów produkcji biomasy mikroalg

Zmienna	Jednostka	Fotobioreaktor rurowy	Staw torowy
Produkcja biomasy	kg/rok	100 000	100 000
Produktywność objętościowa	kg/m ³ /dzień	1,535	0,117
Produktywność powierzchniowa	kg/m ² /dzień	0,048	0,035
Stężenie biomasy	kg/m ³	4,00	0,14
Wymagana powierzchnia	m ²	5681	7828
Wydajność oleju	m ³ /ha	136,9 ^{a)}	99,4 ^{a)}
Stosunek powierzchni do objętości	m ⁻¹	20–200	5–10
Zużycie energii na mieszanie	W/m ³	2000–3000	4
Nakład inwestycyjny	\$/m ²	~150	~15
Koszt produkcji oleju	\$/L	1,81 ^{b)}	1,40 ^{b)}

^{a)} 70% (w/w) zawartość oleju w komórce; ^{b)} dla 30% (w/w) zawartości oleju w komórce.

Źródło: [Christi 2007; Alabi i in. 2009; Jorquera i in. 2010; Mata i in. 2010; Demirbas, Demirbas 2011].

3.2. Fykoremediacja jako proces towarzyszący produkcji biomasy mikroalg

3.2.1. Oczyszczanie zasobów wodnych

Fykoremediacja to termin oznaczający remediację wody, gleby i powietrza przeprowadzaną przez algi [Olguin 2003; Rawat i in. 2011]. Fykoremediacja obejmuje kilka zastosowań: (a) usuwanie i przekształcanie odpadów organicznych ze ścieków komunalnych i innych ścieków bogatych w materię organiczną, (b) usuwanie związków nieorganicznych, toksycznych i metali ciężkich wykorzystując właściwości biosorpcyjne alg, (c) neutralizację ścieków kwaśnych, (d) usuwanie CO₂, (e) prze-

kształcenie i degradację ksenobiotyków oraz (f) wykrywanie związków toksycznych za pomocą biosensorów opartych na algach [Olguin 2003]. Biologicznemu usuwaniu zanieczyszczeń, towarzyszy namnażanie biomasy organizmów, bez wykorzystywania zasobów świeżej wody. Oczyszczanie ścieków za pomocą mikroalg znakomicie komponuje się ze zrównoważoną produkcją biopaliw [Rawat i in. 2011].

Sydney i in. [2011] z 20 szczepów mikroalg sprawdzonych pod względem szybkości wzrostu w ściekach domowych wybrali *Botryococcus braunii* LEM 14, wykazującego najlepszą ogólną charakterystykę. Produkcja biomasy (1,88 g/L) powiązana była z najwydajniejszym usuwaniem azotu i fosforu (odpowiednio 80 i 100%) oraz zawartością lipidów (36%). Teoretyczne wyliczenia autorów wskazują, że odpowiada to 3,3 t lipidów ha/rok produkcji przemysłowej w 20-centymetrowych lagunach. Dodatkowo, szczep ten odznaczył się znaczącym poborem CO₂ (145 mg CO₂ g_{biomasy}⁻¹/L/d) [Sydney i in. 2011].

Mikroalgi są również zdolne wiązać metale do 10% ich suchej masy [Rajamani i in. 2007]. Usuwanie patogenów zachodzi w sposób pośredni, przez wzrost wartości pH, temperatury i stężenia rozpuszczonego tlenu, związane ze wzrostem mikroalg [de-Bashan, Bashan 2010].

3.2.2. Usuwanie CO₂ przez mikroalgi

W celu intensyfikacji wzrostu mikroalg wymagane jest znacznie wyższe stężenie źródła węgla uzyskiwane przez zastosowanie sprężonego CO₂, przemysłowych gazów odlotowych lub rozpuszczalnego węglanu (Na₂CO₃, NaHCO₃) [Wang i in. 2008; Doucha i in. 2005; Bilanovic i in. 2009]. Zrównoważonym rozwiązaniem jest hodowla mikroalg w pobliżu elektrowni i zakładów przemysłowych emitujących gazy cieplarniane, które są następnie odbierane i wykorzystywane w produkcji biomasy i jej składników. Chiu i in. [2011] zastosowali okresowe dozowanie gazów odlotowych huty stali (25% CO₂, 4% O₂, 80 ppm NO i 90 ppm SO₂) w produkcji biomasy *Chlorella* sp. MTF-7, uzyskując stężenie biomasy, produktywność biomasy oraz zawartość lipidów, odpowiednio, 2,87 g/L, 0,52 g/L/d i 25,2%. Dodatkowo efektywność usuwania CO₂ wyniosła średnio 60% [Chiu i in. 2011]. Wykorzystanie gazów odlotowych wiąże się z ekstremalnymi warunkami hodowli mikroalg. Oprócz wysokiego stężenia CO₂ należy brać pod uwagę obecność innych gazów (NO_x, SO_x, C_xH_y, CO), kwasów halogenowych, metali ciężkich i cząstek stałych, często działających toksycznie na komórki [Van den Henden i in. 2012]. Mikroalgi powinny odznaczać się tolerancją na wysoką temperaturę, aby zminimalizować koszty chłodzenia gazów [Bilanovic i in. 2009].

3.3. Czynniki wpływające na produktywność biomasy i lipidów

Olejodajne szczepy mikroalg można podzielić na dwie grupy: (1) o wysokiej zawartości oleju, ale słabym wzroście oraz (2) niskiej zawartości oleju i zdolności do szybkiego wzrostu [Feng i in. 2012; Lv i in. 2010]. Żadna z tych grup nie pozwala na wydajną

produkcję oleju z alg. W celu zwiększenia produktywności lipidów w komórkach organizmów stosuje się zmianę warunków środowiska [Jiang i in. 2012] lub modyfikacje genetyczne [Amaro i in. 2011].

Zwiększenie syntezy oleju uzyskuje się najczęściej przez ograniczenie dostępu związków budulcowych (zwierających azot, fosfor, krzem), hamując podziały komórkowe [Chen, Wu 2011; Dean i in. 2010]. Jediną możliwością jest wówczas asymilacja i konwersja nadmiaru węgla do kwasów tłuszczowych, a następnie lipidów [Subramaniam i in. 2010]. Jednak zabiegi te wymagają kompromisu między produkcją biomasy i produkcją oleju.

Odpowiednio dobierając stężenie CO₂, można zwiększać ilość biomasy i produktywność triacylogliceroli. Ho i in. [2012] zbadali zdolność *Scenedesmus obliquus* CNW-N do efektywnego wiązania CO₂. Spośród analizowanych stężeń CO₂ (5–70%) wybrano optymalne (10%), które zapewniało najlepsze parametry stężenia biomasy, produktywności biomasy, współczynnika wzrostu i konsumpcji CO₂ [Ho i in. 2012].

Czas ekspozycji, zakres promieniowania oraz intensywność światła decydują o produktywności fotosyntetycznych mikroalg [Zheng i in. 2011]. Nadmierne oświetlenie powoduje fotoinhibicję, natomiast niedomiar światła – fotolimitację. Dostosowanie intensywności oświetlenia do poszczególnych faz hodowli pozwala na uzyskanie prawie 75-procentowej wyższej produktywności biomasy [Chen i in. 2011].

Większość mikroalg preferuje neutralne wartości pH [Zeng i in. 2011]. Istnieją także gatunki acydofilne, takie jak *Chlamydomonas acidophila* (pH = 4) [Nishikawa i in. 2006] lub alkalofilne, takie jak *Spirulina platensis* (pH = 10) [Çelekli i in. 2009]. Podobnie mikroalgi halofilne, takie jak *Dunaliella* sp., wymagają do prawidłowego rozwoju środowiska o dużym zasoleniu [Rao i in. 2007]. Optymalna temperatura hodowli waha się w granicach 25–35 °C [Renaud i in. 2002].

Modyfikacje genetyczne są obecnie ograniczone z powodu słabej znajomości mechanizmów leżących u podstaw regulacji ekspresji genów mikroalg i niewielkiej liczby szczepów ulegających modyfikacjom (wyjątek stanowi *Chlamydomonas reinwardtii*). Zmiany dotyczą m.in. podwyższenia aktywności enzymów szlaku syntezy *de novo* kwasów tłuszczowych (np. karboksylazy acetylo-CoA) czy uzyskiwania mutantów pozbawionych enzymów warunkujących gromadzenie skrobi zamiast lipidów [Amaro i in. 2011; Wang i in. 2009].

4. Charakterystyka oleju z alg

Olej z alg charakteryzuje się właściwościami fizykochemicznymi zbliżonymi do tradycyjnych olejów roślinnych [Chen i in. 2012]. Niższa wartość liczby kwasowej wskazuje na preferencje mikroalg do gromadzenia w oleju neutralnych lipidów (tab. 4).

Tabela 4. Porównanie właściwości oleju z *Chlorella protothecoides* i oleju rzepakowego

Parametr	Jednostka	Olej z <i>C. protothecoides</i>	Olej rzepakowy
Liczba kwasowa	mg KOH/g	0,13	1,516
Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	18	14
Gęstość (15 °C)	kg/m ³	919	914
Liczba jodowa	g I ₂ /100g	119,1	112
Lepkość kinematyczna (40 °C)	mm ² /s	33,06	34,8
Stabilność oksydacyjna (110 °C)	h	8,83	8,1

Źródło: [Chen i in. 2012; Laza, Bereczky 2011].

Skład kwasów tłuszczowych mikroalg zależy od gatunku oraz warunków hodowli [Demirbas, Demirbas 2011]. Triacyloglicerole składają się głównie z kwasów tłuszczowych C16-C18 [Chen i in. 2012]. Olej z alg cechuje się wysokim stopniem nienasylenia wiązań reszt kwasowych podobnie do wielu olejów roślinnych (tab. 5). *Chlorella protothecoides* syntetyzuje 91% nienasyconych kwasów tłuszczowych, olej rzepakowy zawiera 94%, olej sojowy 84%, a olej palmowy 50% tych kwasów [Dubois i in. 2007; Chen i in. 2012]. Niektóre mikroalgi zdolne są do syntezy wielonienasyconych kwasów tłuszczowych, powyżej 3 podwójnych wiązań, takich jak kwas eikozapentaenowy (C20:5, n-3) czy kwas arachidonowy (C20:4, n-6) [Ratled-

Tabela 5. Porównanie składu kwasów tłuszczowych (%) wybranych mikroalg i olejów roślinnych

Organizm	Udział w % (w/w) kwasów tłuszczowych									
	14:0	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3 n-3	20:4 n-6	20:5 n-3	inne
Mikroalgi										
<i>Chlorella vulgaris</i>	–	22	ślady	10	14	26	5	–	–	23
<i>Chlorella minutissima</i>	12	13	21	–	1	2	–	3	45	
<i>Isochrysis galbana</i>	12	10	11	–	3	2	–	<1	25	
<i>Chlorella protothecoides</i>		5		2	65	18	7	–	–	2 (20:0) 1 (24:0)
Olej roślinny										
Rzepakowy ^a	–	5	–	2	60	21,5	10	–	–	1 (20:0, 22:0)
Sojowy ^a	–	11	–	4	24	52	8	–	–	–
Palmowy ^a	<1	44	–	4	39	10	–	–	–	–

^{a)} Wartości nie sumują się do 100%.

Źródło: [Ratledge, Hopkins 2006; Chen i in. 2012; Dubois i in. 2007].

ge, Hopkins 2006]. Są one podatne na oksydację podczas składowania, co ogranicza przydatność takiego oleju w produkcji biodiesla. Jednym z rozwiązań tego problemu może być częściowe uwodornienie oleju [Christi 2007].

5. Zastosowanie oleju z alg w produkcji biodiesla

Publikowane prace związane z zastosowaniem mikroalg w produkcji biodiesla w większości koncentrują się na metodach zwiększania produktywności lipidów. Nieliczne badania dotyczą konwersji oleju z alg do biodiesla, szczególnie z zastosowaniem katalizatorów enzymatycznych.

Lai i in. [2012] wykazali możliwość enzymatycznej syntezy estrów z oleju z alg (*Chlorella pyrenoidosa*). W optymalnych warunkach, z zastosowaniem immobilizowanej lipazy *Penicillium expansum* lub preparatu Novozym 435 wydajność reakcji wyniosła odpowiednio 90,7 i 86,2% w cieczy jonowej [BMIm][PF₆] oraz 48,6 i 44,4% w *tert*-butanolu [Lai i in. 2012]. Xiong i in. [2008], także stosując immobilizowaną lipazę, uzyskali 98-procentową konwersję oleju z *Chlorella protothecoides*. Stwierdzono, że właściwości otrzymanego biodiesla były porównywalne z konwencjonalnym olejem napędowym i zgodne z normą ASTM [Xiong i in. 2008]. Li i in. [2007] prowadzili heterotroficzną hodowlę *Chlorella protothecoides* w skali laboratoryjnej i komercyjnej (5 i 750 L oraz bioreaktor o pojemności 11 tys. L). Otrzymany olej poddali transestryfikacji z zastosowaniem immobilizowanej lipazy *Candidia* sp. 99–125 w środowisku rozpuszczalników organicznych. W optymalnych parametrach (75% enzymu (w/w), *n*-heksan, stosunek molowy metanol:olej 3:1, trzykrotne dozowanie alkoholu, temperatura 38 °C, 10% wody i pH = 7) otrzymali 98,15% konwersję oleju do biodiesla. Powiększenie skali nie wpływało znacząco na współczynnik produktywności biodiesla wynoszący 7,02 g/L, 6,12 g/L, 6,24 g/L,

Tabela 6. Porównanie właściwości biodiesla otrzymanego z oleju z alg i wymogów europejskiej normy EN 14214

Parametr	Jednostka	Biodiesel	
		Olej z <i>C. protothecoides</i>	EN 14214
Liczba kwasowa	mg KOH/g	0,29	maksymalnie 0,5
Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	-13	0 [lato] -20 (zima)
Gęstość [15 °C]	kg/m ³	882	860–900
Liczba jodowa	g I ₂ /100g	112,2	maksymalnie 120
Lepkość kinematyczna [40 °C]	mm ² /s	4,43	3,5–5,0
Stabilność oksydacyjna [110 °C]	h	4,52	minimalnie 6,0

Źródło: [Chen i in. 2012].

odpowiednio dla bioreaktora o pojemności 5 L, 750 L i 11 tys. L [Li i in. 2007]. Z kolei Wahlen i in. [2011] zaprezentowali możliwość transestryfikacji *in situ* biomasy mikroalg, cyjanobakterii i ich dzikich szczepów z zastosowaniem kwasu siarkowego jako katalizatora. Zaletą tej metody jest jednoczesna ekstrakcja i transestryfikacja oleju, która pozwala ominąć wiele etapów konwencjonalnej technologii wydobycia tłuszczu. Zauważono, że ilość tworzonych bioestrów jest większa niż wynika to z ogólnej zawartości triacylogliceroli, dzięki udziałowi fosfolipidów błonowych w trakcie reakcji [Wahlen i in. 2011].

Biodiesel z oleju z alg spełnia większość wymogów biopaliwa transportowego – tab. 6 [Chen i in. 2012]. Istotnym problemem jest wysoki stopień nienasycenia kwasów tłuszczowych powodujący obniżenie stabilności oksydacyjnej. Europejska norma EN 14214 określa maksymalny limit zawartości estrów kwasu linolenowego w biodieslu do 12% (mol/mol) oraz do 1% dla estrów zawierających co najmniej 4 podwójne wiązania [Christi 2007]. Wartość opałowa biodiesla z oleju rzepakowego i sojowego wynosi 39,5 MJ/kg, natomiast z oleju z alg, ze względu na stopień nienasycenia, jest nieznacznie wyższa i wynosi 41 MJ/kg [Demirbas, Demirbas 2011].

6. Podsumowanie

Na podstawie zaprezentowanego przeglądu literatury można stwierdzić, że potencjał mikroalg w syntezie oleju jest ogromny, lecz nadal niewykorzystany. W przeciwieństwie do tradycyjnej uprawy roślin, hodowla mikroalg pozwala na rozwiązanie problemów ilości i dostępności surowca w produkcji biodiesla oraz ochronę zasobów wodnych i lądowych. Znaczna część badań dotyczy jedynie skali laboratoryjnej w ściśle określonym środowisku, co nie odpowiada warunkom przemysłowym. Powiększenie skali hodowli sprawia wielkie trudności techniczne i finansowe, które ograniczają komercyjne zastosowanie oleju mikrobiologicznego. Wiadomo, że w Polsce (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski) prowadzone są prace naukowo-badawcze dotyczące opracowania warunków hodowli olejodajnych szczepów mikroalg, metod wydzielenia oleju oraz jego wykorzystania w produkcji biodiesla. O możliwościach wdrożenia tych propozycji zadecyduje analiza kosztów. Tradycyjna produkcja roślinna jest od 2 do 3 razy tańsza od hodowli mikroalg [Demirbas, Demirbas 2011]. Szacunkowe koszty produkcji biodiesla z oleju z alg wynoszą od 1,94 €/L do 7,44 €/L i są zbyt wysokie, aby konkurować z paliwem kopalnym [Delrue i in. 2012; Rosenberg i in. 2011]. Warto zaznaczyć, że są to wyliczenia teoretyczne, ponieważ do tej pory nie prowadzono komercyjnej produkcji oleju z alg w skali przemysłowej. Zastosowanie szczepów o wyższej produktywności oleju, obniżenie kosztów inwestycyjnych oraz nakładów na procesy wydobycia tłuszczu mogą w przyszłości pozwolić na przemysłową produkcję biodiesla trzeciej generacji.

Literatura

- Alabi A.O., Tampier M., Bibeau E., *Microalgae Technologies and Processes for Biofuels/Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability and Barriers to Implementation*, 2009, http://www.bcic.ca/images/stories/publications/lifesciences/microalgae_report.pdf (20.08.2012).
- Alzate M.E., Muñoz R., Rogalla F., Fdz-Polanco F., Pérez S.I., *Biochemical methane potential of microalgae: Influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentration and pretreatment*, „Bioresource Technology” 2012, vol. 123, s. 488–494.
- Amaro H.M., Guedes A.C., Malcata F.X., *Advances and perspectives in using microalgae to produce „Biodiesel Applied Energy”* 2011, vol. 88, s. 3402–3410.
- Atabani A.E., Silitonga A.S., Badruddin I.A., Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Mekhilef S., *A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2012, vol. 16, no. 4, s. 2070–2093.
- Balat M., *Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – a review of current work*, „Energy Conversion and Management” 2011, vol. 52, no. 2, s. 1479–1492.
- Bilanovic D., Andargatchew A., Kroeger T., Shelef G., *Freshwater and marine microalgae sequestration of CO₂ at different C and N concentrations—response surface methodology analysis*, „Energy Conversion and Management” 2009, vol. 50, no. 2, s. 262–267.
- Borowitzka M.A., *Commercial production of microalgae: Ponds, tanks, tubes and fermenters*, „Journal of Biotechnology” 1999, vol. 70, no. 1–3, s. 313–321.
- Brennan 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, vol. 14, s. 557–577.
- Briassoulis D., Panagakis P., Chionidis M., Tzenos D., Lalos A., Tsinos C., Berberidis K., Jacobsen A., *An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of Nannochloropsis sp.*, „Bioresource Technology” 2010, vol. 101, no. 17, s. 6768–6777.
- Bryan B.A., King D., Wang E., *Biofuels agriculture: Landscape-scale trade-offs between fuel, economics, carbon, energy, food, and fiber*, „Global Change Biology Bioenergy” 2010, vol. 2, no. 6, s. 330–345.
- Çelekli A., Yavuzatmaca M., Bozkurt H., *Modeling of biomass production by Spirulina platensis as function of phosphate concentrations and pH regimes*, „Bioresource Technology” 2009, vol. 100, no. 14, s. 3625–3629.
- Chen X., Goh Q.Y., Tan W., Hossain I., Chen W.N., Lau R., *Lumostatic strategy for microalgae cultivation utilizing image analysis and chlorophyll a content as design parameters*, „Bioresource Technology” 2011, vol. 102, no. 10, s. 6005–6012.
- Chen Y.F., Wu Q., *Production of biodiesel from algal biomass: Current perspectives and future*, [w:] A. Pandey, C. Larroche, S. Ricke, C.-G. Dussap, E. Gnansounou (red.), *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*, Elsevier, 2011 s. 399–409.
- Chen Y.-H., Huang B.-Y., Chiang T.-H., Tang T.-C., *Fuel properties of microalgae (Chlorella protothecoides) oil biodiesel and its blends with petroleum diesel*, „Fuel” 2012, vol. 94, s. 270–273.
- Chiu S.Y., Kao C.Y., Huang T.T., Lin C.J., Ong S.C., Chen C.D., Chang J.S., Lin C.S., *Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using Chlorella sp. cultures*, „Bioresource Technology” 2011, vol. 102, no. 19, s. 9135–9142.
- Christi Y., *Biodiesel from microalgae*, „Biotechnology Advances” 2007, vol. 25, s. 294–306.
- Dean A.P., Sigee D.C., Estrada B., Pittman J.K., *Using FTIR spectroscopy for rapid determination of lipid accumulation in response to nitrogen limitation in freshwater microalgae*, „Bioresource Technology” 2010, vol. 101, s. 4499–4507.
- De-Bashan L.E., Bashan Y., *Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects*, „Bioresource Technology” 2010, vol. 101, no. 6, s. 1611–1627.

- Delrue F., Setier P.A., Sahut C., Cournac L., Roubaud A., Peltier G., Froment A.K., *An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalga*, „Bioresource Technology” 2012, vol. 111, s. 191–200.
- Demirbas A., Demirbas M.F., *Importance of algal oil as a source of biodiesel*, „Energy Conversion and Management” 2011, vol. 52, s. 163–170.
- Doucha J., Straka F., Livansky K., *Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (Chlorella sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor*, „Journal of Applied Phycology” 2005, vol. 17, no. 5, s. 403–412.
- Dubois V., Breton S., Linder M., Fanni J., Parmentier M., *Fatty acid profiles of 80 vegetable oils with regard to their nutritional potential*, „European Journal of Lipid Science and Technology” 2007, vol. 109, s. 710–732.
- Fazal M.A., Haseeb A.S.M.A., Masjuki H.H., *Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility, performance, emission and engine durability*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2011, vol. 15, no. 2, s. 1314–1324.
- Fedorov A.S., Kosourov S., Ghirardi M.L., Seibert M., *Continuous hydrogen photoproduction by Chlamydomonas reinhardtii using a novel two-stage, sulfate-limited chemostat system*, „Applied Biochemistry and Biotechnology” 2005, vol. 121–124, s. 403–412.
- Feng P., Deng Z., Fan L., Hu Z., *Lipid accumulation and growth characteristics of Chlorella zofingiensis under different nitrate and phosphate concentrations*, „Journal of Bioscience and Bioengineering” 2012, vol. 114, no. 4, s. 405–410.
- Gołaszewski J., *Renewables and environmental implications*, „Environmental Biotechnology” 2009, vol. 5, no. 1, s. 11–24.
- Ho S.H., Chen W.M., Chang J.S., *Scenedesmus obliquus CNW-N as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production*, „Bioresource Technology” 2012, vol. 101, no. 22, s. 8725–8730.
- Jiang Y., Yoshida T., Quigg A., *Photosynthetic performance, lipid production and biomass composition in response to nitrogen limitation in marine microalgae*, „Plant Physiology and Biochemistry” 2012, vol. 54, s. 70–77.
- Jiménez C., Cossio B.R., Niell X., *Relationship between physico-chemical variables and productivity in open ponds for the production of Spirulina: A predictive model of algal yield*, „Aquaculture” 2003, vol. 221, s. 331–345.
- Jorquera O., Kiperstok A., Sales E.A., Embiruçu M., Ghirardi M.L., *Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors*, „Bioresource Technology” 2010, vol. 101, no. 4, s. 1406–1413.
- Kapdan I.K., Kargi F., *Bio-hydrogen production from waste materials*, „Enzyme and Microbial Technology” 2006, vol. 38, s. 569–582.
- Lai J.Q., Hu Z.L., Wang P.W., Yang Z., *Enzymatic production of microalgal biodiesel in ionic liquid [BMI][PF₆]*, „Fuel” 2012, vol. 95, s. 329–333.
- Laza T., Bereczky Á., *Basic fuel properties of rapeseed oil-higher alcohols blends*, „Fuel” 2011, vol. 90, no. 2, s. 803–810.
- Li X., Xu H., Wu Q., *Large-scale biodiesel production from microalga Chlorella protothecoides through heterotrophic cultivation in bioreactors*, „Biotechnology and Bioengineering” 2007, vol. 98, no. 4, s. 764–771.
- Liao S., Li F., Yao C.H., Bai F.W., *The progress of ethanol production from microalgae*, „Journal of Biotechnology” 2010, vol. 150, s. 570–580.
- Lv J.M., Cheng L.H., Xu X.H., Zhang L., Chen H.L., *Enhanced lipid production of Chlorella vulgaris by adjustment of cultivation conditions*, „Bioresource Technology” 2010, vol. 101, s. 6797–6804.
- Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S., *Microalgae for biodiesel production and applications: A review*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2010, vol. 14, s. 217–232.
- Nielsen P.M., Brask J., Fjerbaek L., *Enzymatic biodiesel production: Technical and economical considerations*, „European Journal of Lipid Science and Technology” 2008, vol. 110, no. 8, s. 692–700.

- Nishikawa K., Machida H., Yamakoshi Y., Ohtomo R., Saito K., Saito M., Tominaga N., *Polyphosphate metabolism in an acidophilic alga Chlamydomonas acidophila KT-1 (Chlorophyta) under phosphate stress*, „Plant Science” 2006, vol. 170, no. 2, s. 307–313.
- Olguin E.J., *Phycoremediation: Key issues for cost-effective nutrient removal processes*, „Biotechnology Advances” 2003, vol. 22, s. 81–91.
- Rajamani S., Siripornadulsil S., Falcao V., Torres M., Colepicolo P., Sayre R., *Phycoremediation of heavy metals using transgenic microalgae*, „Advances in Experimental Medicine and Biology” 2007, vol. 616, s. 99–109.
- Rao A.R., Dayananda C., Sarada R., Shamala T.R., Ravishankar G.A., *Effect of salinity on growth of green alga Botryococcus braunii and its constituents*, „Bioresource Technology” 2007, vol. 98, no. 3, s. 560–564.
- Ratledge C., Cohen Z., *Microbial and algal oils: Do they have a future for biodiesel or as commodity oils?*, „Lipid Technology” 2008, vol. 20, no. 7, s. 155–160.
- Ratledge C., Hopkins S., *Lipids from microbial sources*, [w]: F.D. Gunstone (red.), *Modifying Lipids for Use in Food*, Woodhead Publishing, 2006, s. 81–90.
- Rawat I., Kumar R.R., Mutanda T., Bux F., *Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production*, „Applied Energy” 2011, vol. 88, s. 3411–3424.
- Renaud S.M., Thinh L.V., Lambrinidis G., Parry D.L., *Effect of temperature on growth, chemical composition and fatty acid composition of tropical Australian microalgae grown in batch cultures*, „Aquaculture” 2002, vol. 211, no. 1–4, s. 195–214.
- Rodolfi L., Zittelli G.C., Bassi N., Padovani G., Biondi N., Bonini G., Tredici M.R., *Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor*, „Biotechnology and Bioengineering” 2009, vol. 102, no. 1, s. 110–112.
- Rosenberg J.N., Mathias A., Korth K., Betenbaugh M.J., Oyler G.A., *Microalgal biomass production and carbon dioxide sequestration from an integrated ethanol biorefinery in Iowa: A technical appraisal and economic feasibility evaluation*, „Biomass Bioenergy” 2011, vol. 35, s. 3865–3878.
- Santori G., Di Nicola G., Moglie M., Polonara F., *A review analyzing the industrial biodiesel production practice starting from vegetable oil refining*, „Applied Energy” 2012, vol. 92, s. 109–132.
- Scott S.A., Davey M.P., Dennis J.S., Horst I., Howe C.J., Lea-Smith D.J., Smith A.G., *Biodiesel from algae: Challenges and prospects*, „Current Opinion in Biotechnology” 2010, vol. 21, s. 277–286.
- Singh J., Gu S., *Commercialization potential of microalgae for biofuels production*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2010, vol. 14, s. 2596–2610.
- Singh R.N., Sharma S., *Development of suitable photobioreactor for algae production*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2012, vol. 16, no. 4, s. 2347–2353.
- Subramaniam R., Dufreche S., Zappi M., Bajpai R., *Microbial lipids from renewable resources: Production and characterization*, „Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology” 2010, vol. 37, s. 1271–1287.
- Sydney E.B., da Silva T.E., Tokarski A., Novak A.C., De Carvalho J.C., Wojciechowski A.L., Larroche C., Socol C.R., *Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage*, „Applied Energy” 2011, vol. 88, no. 10, s. 3291–3294.
- Szczęśna-Antczak M., Kubiak A., Antczak T., Bielecki S., *Enzymatic biodiesel synthesis – key factors affecting efficiency of the process*, „Renewable Energy” 2009, vol. 34, s. 1185–1194.
- Taberner A., Martín del Valle E.M., Galán M.A., *Evaluating the industrial potential of biodiesel from a microalgae heterotrophic culture: Scale-up and economics*, „Biochemical Engineering Journal” 2012, vol. 63, s. 104–111.
- Van Den Hende S., Vervaeren H., Boon N., *Flue gas compounds and microalgae: (Bio-)chemical interactions leading to biotechnological opportunities*, „Biotechnology Advances” 2012 [w druku].

- Vyas A.P., Verma J.L., Subrahmanyam N., *A review on FAME processes*, „Fuel” 2010, vol. 89, no. 1–9, s. 1–9.
- Wahlen B.D., Willis R.M., Seefeldt L.C., *Biodiesel production by simultaneous extraction and conversion of total lipids from microalgae, cyanobacteria, and wild mixed-culture*, „Bioresource Technology” 2011, vol. 102, s. 2724–2730.
- Wang B., Li Y., Wu N., Lan C., *CO₂ bio-mitigation using microalgae*, „Applied Microbiology and Biotechnology” 2008, vol. 79, no. 5, s. 707–718.
- Wang Z.T., Ullrich N., Joo S., Waffenschmidt S., Goodenough U., *Algal lipid bodies: Stress induction, purification and biochemical characterization in wild-type and starchless Chlamydomonas reinhardtii*, „Eukaryot Cell” 2009, vol. 8, s. 1856–1868.
- World Energy Outlook*, OECD/IEA, 2010, <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf> (20.08.2012).
- Xiong W., Li X., Xiang J., Wu Q., *High-density fermentation of microalga Chlorella protothecoides in bioreactor for microbio-diesel production*, „Applied Microbiology and Biotechnology” 2008, vol. 78, no. 1, s. 29–36.
- Zeng X., Danquah M.K., Chen X.D., Lu Y., *Microalgae bioengineering: From CO₂ fixation to biofuel production*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2011, vol. 15, no. 6, s. 3252–3260.

PERSPECTIVES OF THE USE OF ALGAL OIL FOR BIODIESEL PRODUCTION

Summary: Renewable energy sources are an alternative for many countries because of depletion of oil resources, requirements of environmental protection and independence from external energy suppliers. Currently, first-generation biodiesel production has been struggling with the problem of insufficient amount of vegetable oil and limited crop area. The promising alternative can be oleaginous microorganisms the productivity of which exceeds hundreds of times the productivity of plants. This paper presents the potential possibilities of the synthesis of lipids by microalgae and the use of algae oil in the industrial production of biodiesel. The attention is focused on the unique biochemical characteristics of microalgae, biomass production systems and the properties of obtained oil and biodiesel.

Keywords: algae, oils, biodiesel.