



The use of algae for energy: current state and perspectives

Magdalena BŁASZAK¹

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Zakład Mikrobiologii i Biotechnologii Środowiska, e-mail: mblaszak@zut.edu.pl

Abstract

The study presents methods for the production of fuel from algae on the examples of already operating industrial installations. The possibility of using algae as an energy source has been considered since the 1970s, but the real obstacles such as the lack of efficient technology for oil extraction from algal mass, significant energy consumption of the cultures, logistical problems in terms of managing biomass waste accumulating on the beaches effectively devalued promising potential of algae. In the last decade, the idea of replacing traditional biofuel by fuels of second and third generation (waste and algae) has returned. It can be explained with the estimated lower cost of obtaining fuel from algae and the pressure from the European Union environmental policy. Moreover, the profile of research and the implementation has changed. For economic reasons, the technologies using algae oil pressing are being relinquished. Currently the genetically modified organisms (green algae and cyanobacteria) are widely tested as they are easier and cheaper to extract valuable energy substances from. The high costs associated with the acquisition of conventional fuels, environmental policies as well as the achievements of genetic engineering mean that the conversion of algae to energy resource is slowly becoming a reality.

Keywords: algae, renewable energy, technology, biofuel

Streszczenie

Wykorzystanie glonów jako surowca energetycznego: stan aktualny i perspektywy

W pracy przedstawiono metody produkcji paliwa z glonów, na przykładach funkcjonujących instalacji przemysłowych. Możliwość wykorzystania glonów jako surowca energetycznego rozpatrywano od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, ale realne bariery w postaci braku wydajnej technologii tłoczenia oleju z masy glonowej, energochłonność hodowli, problemy logistyczne w zagospodarowaniu odpadowej biomasy zalegającej na plażach, skutecznie dewalowały obiecujący potencjał glonów. W ostatnim dziesięcioleciu powrócono do idei zastępowania tradycyjnych biopaliw, paliwami II i III generacji (z odpadów i glonów). Przemawiają za tym szacunkowo niższe koszty pozyskania paliwa z glonów, jak i presja polityki proekologicznej Unii Europejskiej. Zmienił się również profil badań i wdrożeń. Ze względów ekonomicznych odchodzi się od technologii wykorzystujących tłoczenie oleju z alg, obecnie na szeroką skalę testuje się organizmy zmodyfikowane genetycznie (zielenice i cyjanobakterie), z których łatwiej i taniej wyekstrahować cenne energetycznie substancje. Wysokie koszty związane z pozyskaniem konwencjonalnych paliw, polityka proekologiczna oraz zdobycze inżynierii genetycznej sprawiły, że przekształcanie glonów na surowiec energetyczny staje się powoli faktem.

Słowa kluczowe: glony, odnawialne źródło energii, technologie, biopaliwa

1. Wstęp

W marcu 2013 roku po raz pierwszy do masowego odbiorcy trafiło paliwo z glonów. Klientom stacji paliwowych Propel w San Francisco i w kilku innych miastach stanu California (USA) oferowano oprócz konwencjonalnych paliw, biodiesel z 20% domieszką komponentu z glonów (Soladiesel_{BD}[®]) (Rys. 1.1.) [1,2]. Na podstawie badań konsumenckich przeprowadzonych na zlecenie firmy Solazyme - producenta Soladiesel_{BD}[®] – oceniono, że aż 70% klientów tankujących paliwo na stacjach Propel zadeklarowało, że ze względu na aspekt środowiskowy będą znacznie częściej kupować paliwo glonowe, a 40% klientów wyraziło gotowość kupna „zielonego paliwa”,

nawet jeśli będzie droższe od odpowiednika konwencjonalnego [2]. Glony, podobnie jak rośliny uprawiane na cele energetyczne, kumulują w swoich komórkach duże ilości substancji zapasowych, które można na różne sposoby przekształcać w energię. Duża zawartość substancji zapasowych (skrobia i lipidy) i budulcowych (białko) w komórkach niektórych gatunków glonów umożliwia wykorzystanie ich biomasy na cele energetyczne (produkcja alkoholu, biodiesla i metanu) [3,4,5]. Niektóre gatunki zielenic z rodzajów: *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Spirogyra*, *Dunaliella*, *Botryococcus* w warunkach laboratoryjnych gromadzą lipidy (w tym głównie triacyloglicerole) w ilości ponad 70% s.m. komórek [6,7,8], natomiast cyjanobakterie z rodzaju *Spirulina* wykorzystywane są od wieków jako źródło białka (ok. 70% s.m. komórek) [9]. Jednak kluczową rolę w przydatności glonów jako surowca w różnych gałęziach przemysłu odgrywają: intensywne tempo przyrostu ich biomasy, stosunkowo małe wymagania hodowlane (pokarmowe i powierzchniowe). W ciągu niecałej doby w optymalnych warunkach mikroalgi mogą podwoić swoją liczebność, a zatem również podwoić masę pożądanych surowców [3,5]. Do zalet wynikających z hodowania glonów na szeroką skalę należy dodać aspekt środowiskowy, ponieważ do rozwoju glonów można wykorzystać różne zanieczyszczone matryce, np. odsiarczony gaz przemysłowy, ścieki, odpady przemysłu rolno-spożywczego. Glony intensywnie asymilują makroelementy z różnych źródeł, a dodatkowo wydzielają tlen, jako produkt uboczny fotosyntezy [3]. Teoretycznie nie ma lepszego od glonów surowca pochodzenia biologicznego do pozyskania paliwa, dlatego od kilkudziesięciu lat prowadzone są badania nad ich wykorzystaniem [10].



Rys. 1.1. Kampania firmy Solazyme (marzec 2013), reklamująca i wdrażająca biodiesel z alg do asortymentu produktów stacji paliwowych Propel w Kalifornii (USA) [źródło: http://propelfuels.com/news_and_media/]

2. Paliwo z odpadów i glonów alternatywą dla tradycyjnych biopaliw

W ubiegłym roku Komisja Europejska zaproponowała, by zmniejszyć planowany udział biopaliw konwencjonalnych (pochodzących z upraw rolniczych) w transporcie z 10% do 6%. Pozostała część zapotrzebowania na biopaliwa miała być pokrywana z przetwarzania odpadów i glonów [11]. Takiej propozycji nie poparło kilka państw, między innymi Polska, wskazując na wysokie koszty dla gospodarki i sektora biopaliw. Po kilkunastu miesiącach negocjacji, w czerwcu 2014 roku, osiągnięto polityczne porozumienie w sprawie przepisów, które mają wyznaczyć limit udziału w transporcie konwencjonalnych biopaliw z upraw rolnych. Według zaproponowanego przez Radę Branżową UE ds. Energii rozwiązania poziom wykorzystania biopaliw konwencjonalnych (pierwszej generacji) w transporcie może maksymalnie osiągnąć 7%, resztę popytu (3%) powinny zaspokajać biopaliwa drugiej i trzeciej generacji (biomasa energetyczna z odpadów i glonów) [12]. Jest kilka powodów, dla których Unia Europejska wycofuje się z promowania i dotowania upraw energetycznych, szczególnie upraw zbóż i roślin o potencjalnym spożywczym przeznaczeniu. Najważniejsze z nich to wzrost emisji CO₂ w wyniku zmiany sposobu użytkowania gruntu z trwałych użytków zielonych, lasów, nieużytków na

poła uprawne pod rośliny energetyczne (tzw. pośrednia zmiana użytkowania gruntu - Indirect Land Use Change, ILUC) oraz duży udział importu surowca energetycznego o nieweryfikowalnym pochodzeniu spoza Unii Europejskiej. Poza tym zwiększające się arealy monokulturowych upraw energetycznych to jednocześnie więcej azotanów, fosforanów i środków ochrony roślin w środowisku. Cel polityki unijnej promującej uprawy energetyczne miał być skierowany na zmniejszenie, a nie na zwiększenie emisji CO₂, a już na pewno nie na ograniczanie bioróżnorodności, dlatego obecnie to odpady i glony są preferowaną biomasą do przetwarzania na energię [11].

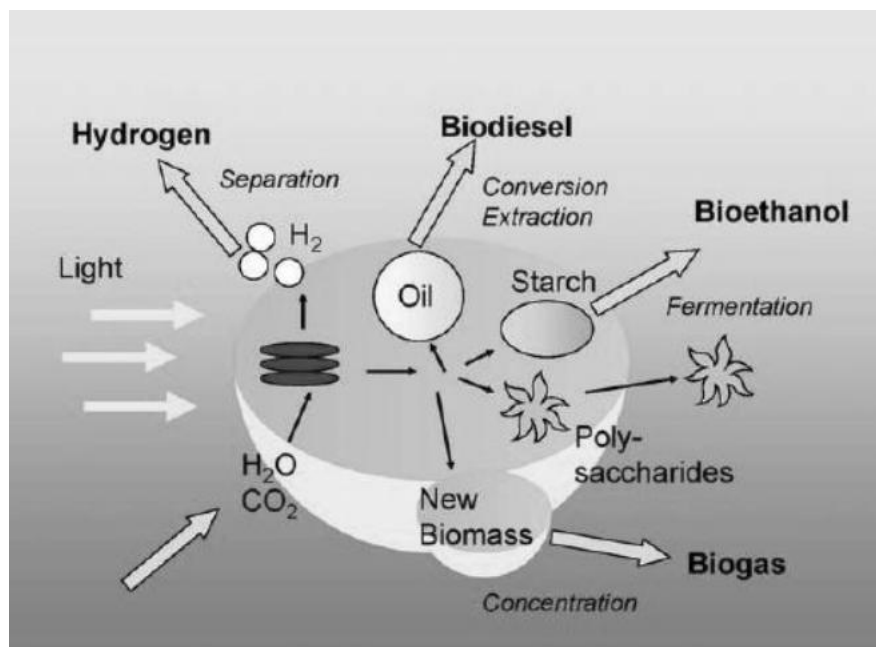
3. Źródła pozyskania i kierunki energetycznego wykorzystania glonów

Pierwsze prowadzone na dużą skalę badania ukierunkowane na pozyskanie paliwa z glonów rozpoczęły się w 1978 roku w Stanach Zjednoczonych. Realizowano projekt „Aquatic Species Program” finansowany przez Departament Energii (całość dotacji to 25 mln USD) [10]. Przez dwadzieścia lat badano potencjał glonów i izolowano te o najlepszych parametrach. Naukowcy zbadali ok. 3 tys. różnych gatunków alg, z których około 300 wytypowali do dalszych eksperymentów. Szukano szczepów zdolnych wyprodukować dużą ilość biomasy w jak najkrótszym czasie, jednocześnie zasobnych w lipidy, mało wrażliwych na zmiany warunków atmosferycznych, odpornych na patogeny. Doświadczenia hodowlane wskazywały, że wyekstrahowanie tłuszczów z komórek glonów jest kosztowne. W raporcie z 1996 roku oceniono, że paliwo z glonów kosztowałoby średnio 50 USD za baryłkę, czyli 2,5 razy więcej niż w tym czasie baryłka ropy naftowej. W kolejnych latach cena ropy naftowej obniżyła się jeszcze bardziej i nawet sukces poznania mechanizmu regulacji metabolizmu lipidowego szczepów, nie uchronił projektu przed zakończeniem. Pozostał kilkuset stronicowy raport z badań, wiedza z której korzystają do tej pory naukowcy z całego świata zainteresowani wdrażaniem glonów do przemysłu energetycznego [10]. Od kilku lat cena baryłki ropy naftowej rzadko spada poniżej 100 USD, dlatego pomysł wyprodukowania glonowego biodiesla powrócił.

Biomasę glonów można pozyskać na wiele sposobów. W latach 70 ubiegłego stulecia rozpoczęto masową produkcję glonów na cele kosmetyczne i dietetyczne w Europie, Izraelu oraz Japonii [13]. W Stanach Zjednoczonych po raz pierwszy wykorzystano otwarty staw hodowlany jako oczyszczalnię ścieków, a nadmierną biomasę glonów przeznaczano do produkcji metanu [14]. Dokonywano wielu prób zagospodarowania biomasy zalegającej w akwenach i u wybrzeży zeutrofizowanych zbiorników wodnych. Teoretycznie jest to najtańszy i logiczny sposób zagospodarowania odpadów, które mogą stać się surowcem [5,15]. Jednak są ograniczenia dotyczące tego sposobu pozyskiwania biomasy glonowej. Trudno przewidzieć zakwit i zaplanować organizację zbierania, transportu, szybkiego wykorzystania [13]. Materiał z plaż jest zanieczyszczony piaskiem i śmieciami oraz szybko podlega rozkładowi, poza tym trudno bezinwazyjnie zbierać tony zalegającej biomasy z użyciem ciężkiego sprzętu z miejsc tak szczególnych jak wybrzeża. Dlatego dominuje ukierunkowana hodowla glonów (zielenic i cyjanobakterii) w stawach otwartych lub fotobioreaktorach [15, 16, 17]. Stawy otwarte to najtańsze warianty hodowlane (Rys. 4.1.), dodatkowo dostęp do wody z mórz lub oceanów oraz intensywne natężenie promieniowania słonecznego decydują o niskich kosztach eksploatacyjnych [4,5,13]. Hodowla w zamkniętych bioreaktorach (Rys. 4.2., Rys. 4.3.) gwarantuje czystość produktu i kontrolę procesów, jednak koszty postawienia instalacji i zużywanej energii są duże [15]. Wszystkie wymienione sposoby pozyskania biomasy alg mają swoje zalety i ograniczenia, nie mniej jednak od dziesiątków lat wykorzystuje się je w celu pozyskania biomasy na cele spożywcze, farmaceutyczne i kosmetyczne. Cena produktu glonowego to koszt kilkuset złotych za kilogram. Popyt na artykuły kosmetyczne, czy suplementy diety wyprodukowane na bazie glonów zabezpiecza opłacalność hodowli, nawet jeśli ponoszone są dodatkowe koszty związane z hodowlą w specjalistycznych fotobioreaktorach. Jednak zakładana cena litra biodiesla drugiej i trzeciej generacji (która musi być konkurencyjna z ceną biopaliwa pierwszej generacji) nie pokryje kosztów dodatkowego dogrzewania i doświetlania wielkopowierzchniowych instalacji [13].

Glony to zróżnicowany takson pod względem rozwoju filogenetycznego poszczególnych grup, zaliczane są tu zarówno drobne zielenice (*Chlorophyta*), jak i kilkunastometrowe plechowe brunatnice (np. wielkomorszcz gruszkonośny - *Macrocystis pyrifera*) [18]. Do mikroalg, oprócz mikroskopijnych rozmiarów chryzofitów (*Chrysophyta*), okrzemek (*Bacillariophyta*) i tobołków (*Pyrrophyta*), zaliczane są także organizmy należące do królestwa *Monera* - mikroskopijne cyjanobakterie (*Cyanobacteria*) [19]. W zależności od gatunku glonów, a co z tym związane od typu metabolizmu, organizmy te kumulują w komórkach różne materiały zapasowe, tj. lipidy,

węglowodany, białka (Rys. 3.1.). Olej można otrzymać z glonów w wyniku tłoczenia i/lub ekstrakcji, natomiast gatunki zasobne w białko lub cukry wykorzystuje się jako surowiec (kosubstrat) do fermentacji alkoholowej lub metanowej w gorzelniach i biogazowniach rolniczych. Coraz częściej glony wymienia się w kontekście pozyskiwania wodoru lub metanolu do ogniw paliwowych [20].



Rys. 3.1. Potencjalne kierunki wykorzystania składników komórkowych glonów na cele energetyczne [3].
[Źródło: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165609001370>]

4. Aktualny stan wykorzystania glonów jako surowca energetycznego przedstawiony na wybranych przykładach ze świata i Europy

Światowym liderem energetycznego wykorzystania glonów w badaniach i działaniach komercyjnych są Stany Zjednoczone. Wynika to z kilku przyczyn. Ważną rolę odgrywa doświadczenie, które naukowcy zdobyli realizując przez dwadzieścia lat wspomniany wcześniej rządowy program „Aquatic Species Program”, ważne jest także przyzwolenie społeczne i ustawodawcze na stosowanie inżynierii genetycznej w celu pozyskania szczepów zdolnych do nadprodukcji substratów energetycznych [21,22,23]. Zresztą od trzydziestu lat firma Cyanotech na wyspie Hawaich archipelagu Hawaje (należącego terytorialnie do Stanów Zjednoczonych) hoduje w stawach otwartych na ponad 36 hektarach cyjanobakterie z rodzaju *Spirulina* i sprzedaje w postaci preparatów dietetycznych *Spirulina Pacifica*[®] i *BioAstin*[®] (Rys. 4.1.) [24]. Niezależnie od przeznaczenia (przemysł kosmetyczny, farmaceutyczny, czy energetyczny) glony w stawach otwartych zasadniczo hoduje się w ten sam sposób. Dlatego Departament Rolnictwa i Departament Marynarki Wojennej USA planują uruchomienie na innej wyspie archipelagu (Oahu) dodatkowych hodowli już na cele energetyczne (paliwo dla maszyn bojowych i samolotów). W 2014 roku planowane jest otwarcie dotowanej przez Departament Energii (25 mln USD) pilotażowej hodowli glonów [25]. Hawaje charakteryzują się idealnymi warunkami do hodowli glonów: woda do układu pobierana jest z oceanu, panuje całoroczne wysokie natężenie promieniowania słonecznego, wysoka temperatura, czynne wulkany. Te warunki idealnie spełniają wymagania mikroalg i przyczyniają się do intensywnego namnażania tych mikroorganizmów. Również koncern paliwowy Shell od 2007 roku współpracuje z firmą HR Biopetroleum, która testuje na Hawajach (ok. 2 ha stawów hodowlanych z glonami z gatunku *Haematococcus pluvialis*) wydajne sposoby pozyskiwania mikroalg. Wyhodowane odmiany potrafią podwoić biomasę w kilka godzin [21]. Rekordową dotację 600 mln USD otrzymała kalifornijska firma Synthetic Genomics specjalizująca się w inżynierii genetycznej mikroorganizmów. Koncern paliwowy ExxonMobil przeznaczył tę kwotę na poszukiwanie i konstruowanie szczepów produkujących zamiast lipidów węglowodory. Obecnie takie szczepy testowane są przez naukowców firmy jedynie w skali laboratoryjnej [26].



Rys. 4.1. Stawy otwarte do hodowli cyjanobakterii (z rodzaju *Spirulina*) na wyspie Hawaje archipelagu Hawaje, właściciel firma Cyanotech Corporation [24]. [Źródło: <http://www.cyanotech.com/company/facility.html>]

W Stanach Zjednoczonych kilkaset komercyjnych firm współpracuje z ośrodkami naukowymi na całym świecie (głównie w Stanach Zjednoczonych, Nowej Zelandii, Australii i Europie) testując na dużą skalę wydajność technologii pozyskiwania biopaliwa z udziałem glonów [21,27,28]. Mimo że trudno podsumowywać efektywność produkcji biopaliw z glonów (dopiero od kilku lat są obecne na rynku motoryzacyjnym i to w ograniczonym zakresie), zawrotna wielkość dotacji rządowych (co najmniej kilkaset mln USD) oraz zainteresowanie i finansowanie inwestycji przez koncerny paliwowe, fundacje, firmy (np. potentaci paliwowi ExxonMobil, Shell, Chevron, BP, fundacja Billa Gatesa, firma Monsanto) włącza glony nie do potencjalnej, ale do aktualnej bazy surowców wykorzystywanych jako biomasa energetyczna [28]. Poniżej przedstawiono w ogólnym zarysie kilka przykładów działających już na skalę przemysłową rozwiązań technologicznych hodowli glonów na cele energetyczne.

Wspomniana wcześniej firma Solazyme oprócz paliwa z 20% domieszką komponentu glonowego (Soladiesel^{BD}®), produkuje co najmniej od kilku lat na zlecenie Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych (United States Navy) paliwa w 100% pochodzenia glonowego o zastrzeżonej nazwie SoladieselHRF-76® i Solajet™ [29]. Na podstawie informacji zawartych na stronie internetowej firmy, można wywnioskować, że glony wykorzystywane do produkcji oleju nie korzystają z typowego dla siebie źródła energii w postaci promieniowania słonecznego, a czerpią ją z procesu fermentacji. Heterotroficzne mikroalgi w bioreaktorach przekształcają cukry zawarte w różnych surowcach energetycznych (wykorzystywane są zarówno rośliny energetyczne, jak i odpady rolno-spożywcze) w olej. Genetycznie zmodyfikowane algi zawierają w swoich komórkach ponad 80% olejów (w przeliczeniu na suchą masę), które po przekształceniu na drodze estyfikacji nabywają właściwości biodiesla, podobnie jak olej rzepakowy. Informacje upubliczniane przez firmę nie zdradzają w jaki sposób olej jest pozyskiwany z glonów, czy tradycyjnym sposobem wykorzystującym tłoczenie, czy zastosowano inne rozwiązanie [2].

Rewolucję w technologii pozyskiwania paliwa z glonów ogłosiła firma Sapphire Energy z San Diego (Kalifornia). Skala produkcji paliwa „Green Crude” jest już od kilku lat systematycznie zwiększana. Docelowo glony mają dostarczać 800 tys. dm³ „zielonej ropy” dziennie. W 2013 roku podpisano pierwsze kontrakty. Szacunkowy koszt 1 baryłki produkowanego paliwa wynosi 60 USD. Glony hodowane są w tradycyjny sposób, czyli w otwartych stawach hodowlanych na farmach zbudowanych w Nowym Meksyku i Kalifornii [27,30,31]. Są to tereny półpustynne, gdzie słońca jest pod dostatkiem, natomiast wody niewiele. Problem rozwiązano zaopatrując hodowle w wodę wydobywaną z zasobów zasolonych wód podziemnych, dodatkowo zastosowano szczepy, które dobrze rozwijają się w małej objętości wody. Jednak najważniejszym osiągnięciem naukowców jest stworzenie za pomocą inżynierii genetycznej szczepu należącego do gromady zielenic, wytwarzającego w komórkach zamiast oleju lekkie frakcje ciekłych węglowodorów [27]. Genetycznie zmodyfikowane zielenice stworzone przez biotechnologów firmy Sapphire Energy nie tylko syntetyzują mieszaninę węglowodorów, ale co istotne, wydzielają ją na zewnątrz komórek [21]. Wielokrotnie pada pytanie „A co będzie jeśli szczepy opanują naturalne środowisko, przedostaną się w sposób zamierzony lub przypadkowy do naturalnych wód?”. Wiceprezes firmy, a zarazem biotechnolog, prof. Stephen Mayfield zapewnia, że zmodyfikowane glony nie są w stanie przeżyć w naturalnym środowisku, tym bardziej, że na pustyni brak warunków do rozwoju tych organizmów [21]. Firma otrzymała dotację rządową w wysokości 100 mln USD [31]. Jak wspomniano wcześniej, separacja, zagęszczenie biomasy glonów oraz ekstrakcja i/lub tłoczenie oleju z komórek to etapy krytyczne (najkosztowniejsze) procesu pozyskiwania oleju z glonów, ominięcie tego problemu jest wielkim ekonomicznym sukcesem. W środowisku występują mikroorganizmy posiadające naturalną zdolność biosyntezy estrów metylowych kwasów tłuszczowych (FAME – fatty acid methyl esters), na przykład wszechobecne bakterie z gatunku *Acinetobacter baylyi*. Niektóre szczepy gatunku *Escherichia coli* syntetyzują triacyloglicerydy i woski, jednak nie są zdolne do wytwarzania FAME. Bakterie *E. coli* poddane modyfikacji genetycznej wytwarzają nawet do 26% estrów etylowych kwasów tłuszczowych w suchej masie komórki. W celu stworzenia „energetycznego mutantu” zastosowano transformację genetyczną, potrzebne geny pobrano od *A. baylyi* (geny odpowiedzialne za syntezę estrów woskowych) oraz geny warunkujące biosyntezę etanolu (pobrane od bakterii *Zymomonas mobilis*), następnie przy udziale enzymu acetylotransferazy przeprowadzano biosyntezę estrów etylowych kwasów tłuszczowych (mikrodiesel) [32,33].

Sunflow[®]-E i *Joule Sunflow*[®]-D to produkty firmy Joule Unlimited z Massachusetts (USA), pierwszy z nich to etanol, a drugi produkt to mieszanina węglowodorów, oba otrzymane bezpośrednio z hodowli cyjanobakterii [23]. Glony (prawdopodobnie zmodyfikowane genetycznie szczepy z gatunku *Synechococcus elongatus*) hodowane są w fotobioreaktorach, które przypominają panele fotowoltaiczne. Solar Converter to pojedynczy opatentowany panel-bioreaktor do hodowli glonów. Setki takich fotobioreaktorów ustawiono już w pobliżu miasta Hobbs na granicy stanów Teksas i Nowy Meksyk (wersja demonstracyjna hodowli). Docelowo ma powstać biorafineria o powierzchni 500 ha i rocznej wydajności około 50 mln litrów paliwa [21,34,35]. W lipcu bieżącego roku firma ogłosiła sukces, Agencja Ochrony Środowiska (The Environmental Protection Agency - EPA) pozytywnie zaopiniowała wykorzystywanie na skalę przemysłową zmodyfikowanych genetycznie cyjanobakterii, co prawda na ograniczonym obszarze – fabryka w Hobbs, ale firma zapowiada dynamiczne starania o rozszerzenie pozwolenia na użytkowanie biopreparatu nawet poza granicami Stanów Zjednoczonych [35].

Zawrotną objętość 70 mld litrów etanolu rocznie, zapowiada otrzymywać firma Algenol z Florydy (USA), wykorzystując do tego celu cyjanobakterie (opatentowana technologia o nazwie Direct To Ethanol[®]). Taka skala produkcji zapowiadana jest na 2030 rok, natomiast obecnie niewielka demonstracyjna biorafineria zlokalizowana na Florydzie zajmuje 15 ha i dostarcza 38 tys. litrów etanolu rocznie [36]. Ciekawe jest to, że zmodyfikowane genetycznie glony hodowane w fotobioreaktorach z tworzywa sztucznego wytwarzają alkohol nie w wyniku procesu fermentacji, a wykorzystując do tego celu energię słoneczną. W 1999 roku dwóch naukowców z Uniwersytetu w Toronto (zatrudnionych następnie w firmie Algenol) opublikowało na łamach czasopisma naukowego Applied and Environmental Microbiology sposób pozyskania cyjanobakterii zdolnych do biosyntezy etanolu w warunkach tlenowych [22]. Cyjanobakterie *Synechococcus* sp. szczep PCC 7942, transformowano wykorzystując geny pobrane od bakterii (*Zymomonas mobilis*) naturalnie zdolnej do wytwarzania dużej ilości alkoholu w wyniku procesu fermentacji. Geny odpowiedzialne za syntezę enzymów, tj. dekarboksylazę pirogronianu i dehydrogenazę alkoholową II zostały sklonowane, wbudowane do wektora plazmidowego pCB4 zawierającego również geny regulatorowe (promotor *lac* z operonu laktozowego) z komórek *Escherichia coli*. Osiągnięto zwiększoną ekspresję kluczowych dla procesu genów i uzyskano nadprodukcję etanolu. Biomasa glonów po odwodnieniu przetwarzana jest w wyniku procesów fizykochemicznych na mieszaninę

węglowodorów, z których następnie tworzone są różnego rodzaju biopaliwa [22]. Firma współpracuje z wieloma jednostkami naukowymi, także w Europie (Uniwersytet Humboldta w Berlinie).



Rys. 4.2. Farma hodowlana cyjanobakterii umieszczonych w fotobioreaktorach z tworzywa sztucznego, właścicielem biorafinerii jest firma Algenol (Fort Myers na Florydzie) [36]. [Źródło: <http://www.algenol.com/media/media-gallery>]

W Europie zainteresowanie wykorzystaniem glonów jako surowca energetycznego przekłada się głównie na badania finansowane z budżetu Unii Europejskiej w ramach Programów Ramowych (6 i 7) i innych. W czerwcu 2009 roku powstała organizacja European Algae Biomass Association, do której należy kilkadziesiąt firm i uczelni europejskich prowadzących badania skierowane na wytwarzanie biopaliw z glonów. Na szczególną uwagę zasługują projekty: BIOFAT (Bio-fuel From Algae Technologies), ALL-GAS, InteSusAl (Integrated Sustainable Algae), na realizację których przeznaczono dotacje z 7 Programu Ramowego, po 6-7 mln EUR. W ramach projektów na dziesięciohektarowych obszarach lokalizowanych w południowej części kontynentu (Włochy, Portugalia, Hiszpania) powstają instalacje demonstracyjne testujące technologie opracowane i opatentowane przez członków zespołów badawczych [37]. Charakterystyczne jest, że w procedurze wyłaniającej projekty do finansowania, zwracano uwagę nie tylko na aspekt energetyczny zaproponowanej technologii, równie ważny był aspekt środowiskowy. Wszystkie przytoczone powyżej projekty, które zdobyły najwięcej środków na realizację, zakładały korzystanie z gazów przemysłowych i/lub ścieków, jako źródła makroelementów [38]. Bardzo interesującą inwestycję w Europie rozpoczyna hiszpańsko-francuskiej firma Bio Fuel Systems (BFS), która zbudowała w rejonie miasta Alicante (na południu Hiszpanii) 400 ośmiometrowych bioreaktorów, w których hodowane są glony. Technologia pozyskiwania „sztucznej ropy” wykorzystuje procesy fizykochemiczne, które prawdopodobnie miały miejsce podczas tworzenia złóż ropy naftowej miliony lat temu, jednak czy wykorzystywana jest bezpośrednio biomasa glonów, czy jedynie produkty metabolizmu tych organizmów, tego nie ujawniono. DITLENEK WĘGLA doprowadzany jest z pobliskiej cementowni [39]. Podobną technologię zastosowaną jednak nie do pozyskiwania energii, a w celu oczyszczania gazów odlotowych pochodzących z konwencjonalnej elektrowni węglowej testuje w Niemczech europejski koncern energetyczny Vattenfall [40].



Rys. 4.3. Fotobioreaktory z glonami umieszczone w rejonie miasta Alicante (na południu Hiszpanii), właściciel firma Bio Fuel Systems (BFS) [41]. [Źródło: <http://bfs-france.com/>]

Głony mogą być użyte jako nośnik ciepła i surowiec energetyczny w skali lokalnej, a nawet osiedlowej, o czym świadczy wybudowany w Hamburgu dom „BIQ House”. Budynek został zaprojektowany przez międzynarodową firmę Arup przy współpracy z firmą SSC Strategic Science Consultants z Niemiec oraz Splitterwerk Architects z Austrii. Na elewacji od strony południowej umieszczono fotobioreaktory z glonami. Wytwarzana energia termiczna w procesie fotosyntezy jest konwertowana na elektryczną. Dodatkowo zamontowane wymienniki ciepła ochładzają hodowlę glonów przekazując energię ciepłą przepływającej w sąsiednim układzie wodzie, nagrzewając ją. Woda gromadzona jest w zbiornikach pod domem i wykorzystywana przez mieszkańców. Gromadzona nadmierna biomasa glonów okresowo jest transportowana do pobliskiej biogazowni, a zysk z produkcji metanu trafia do zarządcy budynku. Był to zwycięski projekt konkursu "Zukunft Bau", spośród 16 zakwalifikowanych projektów właśnie ten zdobył najwięcej uznania i źródło finansowania dotacją rządową 5 mln EUR. Budowę domu zakończono, inauguracja otwarcia odbyła się w kwietniu 2013 roku [42]. Wysokie koszty realizacji inwestycji sprawiają, że masowe wykorzystanie tej technologii jest raczej wątpliwe.

W Polsce wiele instytucji naukowych zajmuje się badaniami potencjału biomasy glonowej w ramach projektów badawczych krajowych i unijnych. Na wyróżnienie zasługuje zespół badawczy z Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie (Wydział Nauk o Środowisku, Katedra Inżynierii Środowiska), który zdobywając środki unijne na realizację kolejnych projektów testuje wiele kierunków wykorzystania glonów, np. pozyskiwanie biodiesla, metanu, wodoru [4,5,16]. Jednostka naukowa jest uczestnikiem Bałtyckiego Klastra Ekoenergetycznego, w ramach którego realizowane są liczne zadania badawcze z zakresu wykorzystywania odnawialnych źródeł energii, np. „Pozyskiwanie i przetwarzanie biomasy powstającej w zeutrofizowanych wodach powierzchniowych”. Zadanie to zrealizowano w ramach projektu kluczowego „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii”, finansowanego ze środków Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013 [43].

W 2013 roku zakończono zasługujący na uwagę międzynarodowy projekt pt. "Wetlands, Algae and Biogas", mający na celu przeciwdziałanie eutrofizacji południowego Bałtyku. Projekt współfinansowano ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Południowy

Bałtyk (dofinansowanie projektu to ok. 1,2 mln EUR). W projekcie brało udział 11 partnerów ze Szwecji i z Polski. W ramach projektu zweryfikowano między innymi przydatność energetyczną glonów zbieranych ze strefy brzegowej Bałtyku (okolice Trójmiasta) [44]. Mimo, że teoretycznie glony byłyby doskonałym surowcem/kosubstratem dla biogazowni rolniczych, ponieważ zawierają dużo azotu, nie wymagają nakładów finansowych i terenu na uprawę (w przeciwieństwie do roślin energetycznych), lokalnie pojawiają się w dużych ilościach w wyniku zakwitów; to jednak wyniki analiz potencjalnego ich wykorzystania, jak i parametry otrzymanego biogazu z tej biomasy są niekorzystne [45]. Problemy dotyczące wykorzystania odpadowej biomasy glonowej pojawiają się już na początku toku działań, a związane są z nieprzewidywalnością zakwitów i ich okresowością, jak również kłopotliwym transportem wilgotnej biomasy. Biomasa glonów (zielenice, brunatnice krasnorosty) pozyskiwana z plaż Trójmiasta w latach 2010-2012 nie zaspakajałaby zapotrzebowania biogazowni na biomasę (ilość biomasy glonów oszacowano średnio na 550 ton/sezon), dlatego poszukiwano innego źródła taniej biomasy roślinnej. W ciągu roku usuwana jest zielona biomasa z instalacji elektrowni wodnych i przepompowni województwa Pomorskiego w ilości średnio 30 tys. ton, dlatego to źródło biomasy również włączono do badań. Porównywano wydajność biogazu z wariantu pierwszego, tj. obornik koński i biomasa roślinna (dominowały gatunki: grążel żółty, lilia wodna, rogatek sztywny, strzałka wodna, rzęsa wodna) oraz z wariantu drugiego, tj. obornik koński i biomasa glonowa (zielenice, brunatnice, krasnorosty zebrane z plaż). Wyniki wskazały, że biogazu powstaje mniej, w tym metanu, a więcej siarkowodoru podczas fermentacji biomasy z glonami [45]. Zupełnie inne wyniki otrzymał Dębowski [5], testując w skali laboratoryjnej przydatność czystych kultur zielenic *Chlorella* sp. i *Scenedesmus* sp. jako surowca dla fermentacji metanowej. Najlepszym surowcem, pod względem efektywności okazała się mieszanina glonów i kiszonki kukurydzy, im mniej glonów w ogólnej biomacie tym mniej uzyskiwano biogazu, w tym metanu. Jednak do badań użyto wyselekcjonowanych szczepów, a w naturze występuje bioróżnorodność w zależności od miejsca i terminu pobrania biomasy glonów.

5. Podsumowanie

Idealnym wariantem hodowli glonów pod względem ekonomicznym wydaje się system korzystający z energii promieniowania słonecznego. Jednak by wzrost glonów był obfity potrzeba intensywnego promieniowania świetlnego i wielogodzinnej ekspozycji oraz temperatury nie spadającej poniżej 20°C, w przeciwnym razie wzrost glonów będzie nierówny i mało wydajny. Optymalne natężenie światła dla glonów (co przekłada się na wydajność fotosyntezy) jest zazwyczaj rzędu tysięcy do dziesiątek tysięcy luksów (lx), czyli zdecydowanie większe, niż w przypadku optymalnego natężenia światła dla większości roślin (zazwyczaj do 10 tys. lx). Wybór sposobu prowadzenia hodowli - tzn. w stawach otwartych, czy w fotobioreaktorach - ma mniejsze znaczenie, ponieważ oba warianty mają wady i zalety. Trudno jednoznacznie ocenić, która jest bardziej korzystna, zależy to od wielu czynników zarówno lokalnych środowiskowych, jak i od technologii. Dlatego ograniczeniem dla glonów jako masowo stosowanego surowca energetycznego jest uzależnienie opłacalności hodowania glonów od nielimitowanego dostępu do czynników warunkujących intensywny wzrost tych organizmów (światło, woda, makroelementy, temperatura). Warunki takie panują między innymi na południu Stanów Zjednoczonych, w Australii, na południu Europy i Azji, dlatego obecnie na całym świecie funkcjonują w różnej skali instalacje przeznaczone do hodowli glonów na cele energetyczne. Oczywiście jest wiele hodowli glonów doświetlanych i dogrzewanych. W Niemczech w mieście Klotze hodowany jest w fotobioreaktorach szczep zielenic *Chlorella pyrenoidosa* (z której produkowany jest preparat o nazwie Algomed®). Glony hodowane są w objętości ok. 600 tys. litrów podłoża zamkniętego w 500 km szklanych rur. Jednak przeznaczenie tak wyprodukowanej biomasy glonów jest inne, tzn. kosmetyczne i farmaceutyczne. Miesięczna kuracja preparatem dietetycznym Algomed® lub Spirulina Hawajska Pacifica® (kilkadziesiąt gramów) to koszt 60 – 80 zł, dlatego dodatkowe nakłady finansowe na doświetlanie hodowli mogą być z powodzeniem wkalkulowane w cenę produktu. W przypadku biodiesla glonowego konkurencja cenowa z tradycyjnym biodieslem (i innymi paliwami) nie pozwala na dodatkowe nakłady finansowe. Dlatego wydaje się, że produkcja biomasy glonowej na skalę przemysłową, niezależnie od jej późniejszego kierunku przetwarzania (biodiesel, czy etanol) ma przyszłość jedynie tam, gdzie glony mogą korzystać z intensywnego naturalnego promieniowania świetlnego i wody niezdatnej do wykorzystania w innym celu. Natomiast w skali lokalnej, szanse na powodzenie mają inwestycje korzystające z różnych dróg pozyskania surowca, nawet biomasa odpadowa zebrana z plaż może mieć znaczenie, pod warunkiem że jest jej dużo. W Chinach (Morze Żółte) w latach 2006-2010 miały miejsce masowe zakwit

zielenicy *Enteromorpha prolifera*, zebrano ponad milion ton biomasy, którą częściowo wykorzystano do pozyskania energii (spalanie wysuszonych glonów) i do skarmiania zwierząt. Na szczęście Bałtyk jest na tyle mało zeutrofizowany, by nie stać się pewnym źródłem surowca energetycznego.

Druga konkluzja dotyczy sposobu pozyskiwania z glonów substancji bezpośrednio przekształcannej na biopaliwo. Pierwsze badania realizowane w Stanach Zjednoczonych w ramach projektu „Aquatic Species Program” ujawniły, że najkosztowniejszym i czasochłonnym etapem pozyskiwania oleju z glonów jest ekstrakcja oleju z komórek. Jednak niedawno firmy biotechnologiczne „ominęły” problem stwarzając za pomocą technik inżynierii genetycznej szczepy transgeniczne zdolne do biosyntezy prekursorów węglowodorów wchodzących w skład różnych rodzajów paliw. W dodatku szczepy te skłoniono do wydzielania tych substancji na zewnątrz komórki, bezpośrednio do płynu hodowlanego skąd bardzo łatwo je odzyskać. Dlatego obecnie wątpliwe wydaje się dotowanie badań testujących technologie bazujące na tradycyjnym, mało wydajnym tłoczeniu oleju z alg, czy też na hodowli glonów w warunkach naturalnie do tego nie sprzyjających. Takie tradycyjne technologie lub nieodpowiednio dobrane, nie mają szans konkurować pod względem wydajności z nowoczesnymi.

Literatura

1. Cardwell D. Unilever to Buy Oil Derived From Algae From Solazyme. The New York Times. 2013, (wersja elektroniczna).
2. <http://solazyme.com>, (stan na dzień 08.08.2014)
3. Posten C., Shaub G. Microalgae and terrestrial biomass as source for fuel – A process review. Journal of Biotechnology, 142 (2009), s. 64 – 69.
4. Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M. Wydajność produkcji biomasy glonowej w reaktorze otwartym. Roczniki Ochrony Środowiska, 13 (2011), s. 1743-1752
5. Dębowski M. Wykorzystanie biomasy glonów jako substratu w procesie fermentacji metanowej. Wyd. UWM w Olsztynie. 2013.
6. Minowa T, Yokoyama S., Kishimoto M, Okakura T. Oil production from algal cells of *Dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction. Fuel, 74(12) (1995), s. 1735–1738.
7. Miao X, Wu Q. High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*. Journal of Biotechnology, 110(1) (2004), s. 85–93.
8. Zhang J, Chen WT, Zhang P, Luo Z, Zhang Y. Hydrothermal liquefaction of *Chlorella pyrenoidosa* in sub- and supercritical ethanol with heterogeneous catalysts. Bioresource Technology, 133 (2013), s. 389-397.
9. Czerpak R., Jabłońska-Trypuć A., Pietryczuk A. Znaczenie terapeutyczne, kosmetyczne i dietetyczne niektórych glonów. Postępy Fitoterapii, 3 (2009), s. 168-174.
10. Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P. A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae; Close-Out Report. U.S. Department of Energy. 1998.
11. Rezolucja ustawodawcza Parlamentu Europejskiego z dnia 11 września 2013 r. w sprawie wniosku dotyczącego dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady zmieniającej dyrektywę 98/70/WE odnoszącą się do jakości benzyny i olejów napędowych oraz zmieniającej dyrektywę 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. (P7_TA(2013)0357).
12. Żylińska J. UE: polityczne porozumienie ws. limitu dla biopaliw z upraw rolnych. Polska Agencja Prasowa (PAP), Gospodarka, 2014, (wersja elektroniczna).
13. Kozieł W., Włodarczyk T. Glony – produkcja biomasy. Acta Agrophysica 2011, 17(1) (2011), s. 105-116.
14. Oswald W.J., Golueke C.G. Biological transformation of solar energy. Advances in Applied Microbiology, 2 (1960), s. 223-262.
15. Bień J., Zabochnicka-Świątek M., Sławik L. Możliwości wykorzystania glonów z biomasy zeutrofizowanych zbiorników wodnych jako surowca do produkcji biopaliw. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 13 (3) (2010), s. 197-209.

16. Krzemieniewski M., Dębowski M., Zieliński M. Glony jako alternatywa dla lądowych roślin energetycznych. *Czysta Energia*, 9 (2009), s. 25-27.
17. Lewicki A., Janczak D., Czekala W. Przegląd instalacji do przemysłowej produkcji alg na biomasę. *Technika Rolnicza Ogrodnicza i Leśna*, 3 (2013), s. 11-13.
18. Gumiński S. *Fizjologia glonów i sinic*. Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, 1990.
19. Lavens P., Sorgeloos P. *Manual on the Production and Use of Live Food for Aquaculture*. FAO Fisheries Technical Paper, 361 (1996).
20. Piechocki J., Neugebauer M., Sołowiej P. Ogniwu paliwowe źródłem energii w gospodarstwie rolnym. *Inżynieria Rolnicza* 3(121) (2010), s. 165-170.
21. Hołdys A. Jazda na glonach. *Wiedza i Życie*, 10 (2009), (wersja elektroniczna).
22. Deng M., Coleman J. R. Ethanol Synthesis by Genetic Engineering in Cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(2) (1999), s. 523–528.
23. Lane J. Joule Unlimited: Transformative Technologies 2014 nominee, “Transformation of microbes or algae”. *Biofuels Digest*, 2014, (wersja elektroniczna).
24. <http://www.cyanotech.com/> (stan na dzień 11.08.2014).
25. Cole W. Hawaii crops, algae may get funded for military biofuel. *The Honolulu Star-Advertiser*, 2010, (wersja elektroniczna).
26. <http://www.syntheticgenomics.com/media/> (stan na dzień 12.08.2014)
27. Vaughan V. Tesoro to buy green crude oil. *San Antonio Express-News*, 2013, (wersja elektroniczna).
28. Lane J. The 10 Hottest Trends in Algae. *Biofuels Digest*. 2014, (wersja elektroniczna).
29. Kanellos M. Navy Orders 20,000 Gallons of Algae Fuel From Solazyme. *Greentech Media*, 2009, (wersja elektroniczna).
30. <http://www.sapphireenergy.com/green-crude> (stan na dzień 08.08.214).
31. Lundquist T. I., Woertz I.C., Queen N.W.T., Renemann J.R. A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production. Energy Biosciences Institute. University of California. 2010. <http://www.energybiosciencesinstitute.org/media/AlgaeReportFINAL.pdf>
32. Wackett L.P. Biomass to fuels via microbial transformations. *Current Opinion in Chemical Biology*, 12(2) 2008, s. 187–193
33. Kłosowski G., Macko D., Mikulski D. Rozwój metod biotechnologicznych produkcji biopaliw ze źródeł odnawialnych. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 45 (2010), s. 118-135.
34. <http://www.jouleunlimited.com/about-joule> (stan na dzień 12.08.2014)
35. Lane J. Joule’s quest for fuels from CO₂, sunlight and water. *Biofuels Digest*, 2014, (wersja elektroniczna).
36. <http://www.algenol.com/about-algenol/our-path-forward> (stan na dzień 08.08.2014)
37. Anonim. Hart Energy’s Global Biofuels Center (GBC). Global. Algae Research and Development Update. Algae Workshop Summary. Special Report, 2011. <http://www.algaecluster.eu/resources/pdf/GBCSR062111.pdf>
38. <http://cordis.europa.eu/projects/> (stan na dzień 10.08.2014).
39. Kościelniak P. *Ekologiczna ropa naftowa*. Rzeczpospolita, 2011, (wersja elektroniczna).
40. Wasilewski J., Zimoch J. Wybrane metody oszczędzania i wytwarzania energii w przemyśle chemicznym. *Chemik*, 67 (6) (2013), s. 528-539.
41. <http://bfs-france.com> (stan na dzień 22.07.2014)

42. Degen G. Microalgal bioreactors make an awful racket on house of the future in Hamburg. Deutsche Welle, 2013, (wersja elektroniczna).
 43. <http://www.imp.gda.pl/bkee/> (stan na dzień 07.08.2014).
 44. Bucholt K., Szymczak-Żyła M., Lubecki L., Zamojska A., Hapter H., Tjernström E., Kowalewski G. Nutrient content in macrophyta collected from southern Baltic Sea beaches in relation to eutrophication and biogas production. *Science of the Total Environment*, 473–474 (2014), 298–307.
 45. Kuligowski K., Ziółkowski M., Tonderski A. Biogazownia utylizująca glony morskie i rośliny słodkowodne. Materiały POMCERT. 2012. (http://www.wabproject.pl/files/file/WAB_raport_finalny_pomcert%20PL.pdf).
-