

Magdalena ROKICKA, Marcin ZIELIŃSKI, Marcin DĘBOWSKI,
Karolina KUPCZYK, Artur MIELCAREK*

OPTYMALIZACJA HODOWLI ALG W KIERUNKU ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI KONWERSJI CO₂ W BIOMASĘ – PRZEGLĄD METOD SEKWESTRACJI

Globalne ocieplenie będące efektem antropogenicznej emisji ditlenku węgla, spowodowało z jednej strony dążenie do jej zmniejszenia, a z drugiej powstanie rozmaitych koncepcji jej wykorzystania i magazynowania. Istniejące pomysły to rozpuszczanie CO₂ w wodzie, pompowanie do nieczynnych kopalni, czy wyeksploatowanych złóż ropy naftowej. Wywołuje to jednak obawy dotyczące stabilności i nieszczelności tego typu rozwiązań. Ograniczanie emisji ditlenku węgla może odbywać się poprzez wykorzystanie tego gazu do dynamicznej produkcji biomasy glonowej. Mikroalgi cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem przede wszystkim, dlatego, że odznaczają się cenną własnością pochłaniania tlenków azotu i węgla z wydzielaniem czystego tlenu i azotu oraz przydatnych produktów ubocznych. Formuła oparta na biologicznym wiązaniu ditlenku węgla przez mikroglony, traktowana jest jako potencjalny sposób zmierzający nie tylko do zmniejszenia emisji CO₂, ale także energetycznego wykorzystywania biomasy mikroglonów. Celem pracy jest przegląd metod sekwestracji oraz analiza efektów tego procesu na wydajność produkcji biomasy mikroglonów.

1. WPROWADZENIE

1.1. DEFINICJA I CELE SEKWESTRACJI

Do globalnego ocieplenia i niekorzystnych zjawisk pogodowych w znaczącym stopniu przyczynia się antropogeniczna emisja ditlenku węgla. Nadwyżka CO₂, która nie ulega zbilansowaniu zgromadzi się w atmosferze powodując zmiany klimatu. Jednym z rozwiązań pozwalających na unieszkodliwienie skutków ubocznych z elektrowni i zakładów przemysłowych jest sekwestracja, obejmująca wszystkie procesy mające na celu zapobieganie zmianom klimatu, które polegają na trwałej izolacji CO₂. Sekwestracja ditlenku

* UWM w Olsztynie, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. Warszawska 117, 10-720 Olsztyn

węgla rozumiana jest jako wychwytywanie i bezpieczne składowanie CO₂, który w innym przypadku byłby wyemitowany do atmosfery i w niej pozostał [10]. Najprostszy podział metod sekwestracji przedstawiono w tabeli 1 [11].

Tabela 1. Podział metod sekwestracji [11]

Metoda	Sposób utylizacji CO ₂	Składowanie
Chemiczna Biologiczna Fizyczna	Produkcja chemikaliów Wzmaganie wydobycia ropy naftowej i gazu	Mineralna sekwestracja CO ₂ Biosfera np. zalesianie Składowanie w oceanach Składowanie w utworach geologicznych Zbiorniki gazu i ropy naftowej

Jedną z metod ograniczania emisji gazów cieplarnianych do atmosfery jest ich unieszkodliwienie poprzez umieszczenie w oceanach, litosferze czy biosferze na pewien nieokreślony czas liczony w setkach lat. Poprzez sekwestrację rozumie się także ogół technologii dających możliwość unieszkodliwienia CO₂ w naturalnych środowiskach tj. oceanach lub strukturach geologicznych. W każdym ze środowisk występują inne formy chemiczne węgla, dlatego też sposób sekwestracji w obrębie każdego z nich jest bardzo różnicowany [25].

1.2. PRZEGLĄD METOD SEKWESTRACJI

Procesy sekwestracji rozpoczynają się od wychwytywania ditlenku węgla ze strumienia gazów spalinowych. Metody separacji spalin z gazów spalinowych oparte są na absorpcji chemicznej lub fizycznej (np. na węglu aktywnym, zeolitach), adsorpcji fizycznej w metanolu, glikolu etylenowym. Po czym ciekły ditlenek węgla transportuje się do miejsca składowania. Miejsca składowania dzielą się na cztery podstawowe grupy: sekwestracja w roślinach, oceanach, utworach skalnych oraz w biomase mikroorganizmów [16].

1.2.1. SEKWESTRACJA W ROŚLINACH

Zatrzymywanie dużych ilości ditlenku węgla w glebie i drzewach oraz intensyfikacja fotosyntezy spowalnia procesy rozkładu materii organicznej a zmiany w wykorzystywaniu terenów mogą zwiększyć pobory gazów w zbiornikach wodnych. Lasy tworzą cenny element w ekologicznym bilansie, który zapewnia ciągłość życia, różnorodność krajobrazu oraz neutralizację zanieczyszczeń, a więc też zapobiegają degradacji środowiska. Ekosystem leśny odgrywa znaczącą rolę w cyklu węglowym w szczególności ze względu, iż pochłania on ditlenek węgla z powietrza [12]. Obszary lesiste wstrzymują także inne szkodliwe substancje. Lasy przyczyniają się do zmniejszenia

szania parowania, wpływają na wzrost ilości opadów, a także chronią okoliczne tereny przed hałasem [15]. Metody wychwytywania oparte na ekosystemach mają jedną podstawową wadę: zajmują olbrzymie połacie terenu a także na rezultaty trzeba czekać wiele lat. Naturalne procesy występujące na Ziemi są w stanie w pewnej mierze zmobilizować siły do intensywniejszych procesów pochłaniania CO₂ pod wpływem rosnącego stężenia ditlenku w atmosferze. Nie jest to jednak równoważne ze stwierdzeniem, że środowisko naturalne ma możliwość całkowitego zahamowania wzrostu stężenia CO₂ w atmosferze. Zintensyfikowany przyrost roślinności, który jest powodowany przez zwiększenie stężenia CO₂ w atmosferze, prowadzi m.in., do wzmożonego rozwoju systemu korzeni. Tworzy to idealną pożywkę dla grzybów. Złożoność procesu przyczynia się do magazynowania związków organicznych węgla w glebie. Skutkuje to zwiększeniem ich trwałości w przyziemnej warstwie litosfery nawet do kilkuset lat. Naturalnym procesem hamowania wzrostu stężenia CO₂ jest także jego depozycja w uprawach rolnych. Depozycję można realizować pod warunkiem, że odpady produkcji rolnej m.in. słoma będą użytkowane jedynie do produkcji energii jako substytut paliw kopalnych. Zastosowanie biomasy przy wytwarzaniu energii znacząco zmniejsza udział paliw kopalnych w tym procesie a tym samym, emisję CO₂ do atmosfery. Wprawdzie spaliny, które pochodzą ze spalania biomasy zawierają CO₂, jednak jest to ditlenek, który był już w atmosferze zanim uległ asymilacji przez płody rolne.

1.2.2. SEKWESTRACJA W OCEANACH

Ditlenek węgla rozpuszcza się w wodach oceanu, a na skutek naturalnych procesów. Oceany zarówno pochłaniają jak i emitują ogromne ilości tego gazu do atmosfery. W rzeczywistości, ilość ditlenku węgla magazynowanego w oceanie jest porównywalna z ilością przechowywaną w ekosystemach lądowych. Uważa się, że oceany mogą pochłaniać ostatecznie 80-90% CO₂ z atmosfery i przenieść go do głębokiego oceanu. Metoda sekwestracji w oceanach polega na bezpośrednim włączaniu ditlenku węgla na określoną głębokość poniżej 1000m lub poprzez nasycanie wód siarczanem żelaza, który powoduje zwiększanie ilości fitoplanktonu i poboru CO₂ z atmosfery [25].

1.2.3. SEKWESTRACJA W UTWORACH SKALNYCH

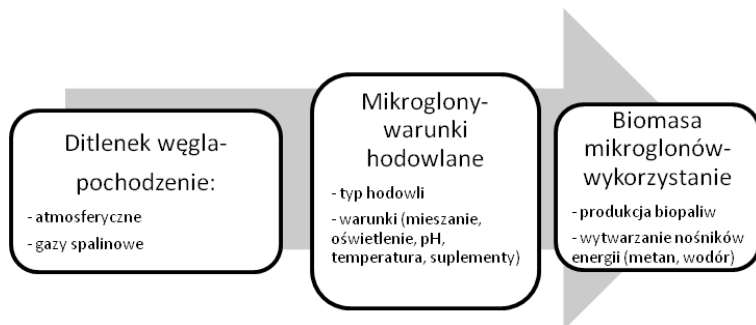
Geologiczna sekwestracja ditlenku węgla obejmuje magazynowanie gazu cieplarnianego w podziemnej formacji, po tym jak zostaje zmagazynowany z elektrowni i innych dużych obiektów przemysłowych. Jest to idea prowadzona na całym świecie ze względu na jej potencjalnie znaczne ograniczenie emisji CO₂. W ramach szerokiego wachlarza technologii, sekwestracja geologiczna odgrywa ważną rolę w stabilizacji

emisji CO₂ i jego stężenia w atmosferze. Geosekwestracja jest szczególnie atrakcyjnym rozwiązaniem nie tylko ze względu na olbrzymie ilości gazu podlegające składowaniu, ale także na okres przechowywania. Proces polega na wtłaczaniu ditlenku węgla w głębokie struktury skalne, poziomy wodonośne czy głębokie niewykorzystane złoża węgla kamiennego [25]. Jest to możliwe dzięki właściwościom tego gazu, który na głębokości około 800 m przechodzi w stan nadkrytyczny i jego objętość zmniejsza się od 1000 m³ na powierzchni do 2,7 m³ na głębokości 2 km. Proces jest stale monitorowany oraz podlega ciągłym kontrolom. Określa się parametry przetrzymwanego gazu a także ewentualne rozszczelnienia. Problematyka geologicznego składowania jest niezwykle złożona. Dotyczy różnorodnych zagadnień geologicznych, złożowych oraz technicznych. Każdy z nich jest przedmiotem oddzielnych, szczegółowych publikacji [26]. Zainteresowanie długoterminowym przechwytywaniem dużych ilości ditlenku węgla za pomocą mineralnej karbonatyzacji jest metodą popularną zwłaszcza tam, gdzie sekwestracja CO₂ pod ziemią jest niewykonalna. Podstawową koncepcją mineralnej karbonatyzacji jest wzorowanie się na naturalnych procesach atmosferycznych, w których tworzone są jony wapnia (Ca) i magnezu (Mg) [18]. Minerale krzemianowe wiążą CO₂ rozpuszczając go w wodzie, tworząc łagodne dla środowiska węglany wapnia i węglany magnezu. W warunkach naturalnych reakcje polegają na wiązaniu CO₂ w takich surowcach jak talk czy surpentyn. Procesy te prowadzą do powolnego starzenia się skał [28].

1.2.4. SEKWESTRACJA BIOLOGICZNA PRZEZ MIKROGLONY

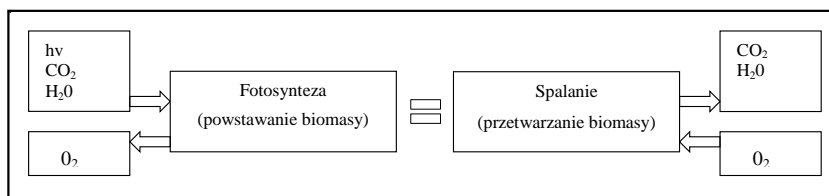
Eksperci z uniwersytetu w Sheffield oraz holenderskiego Centrum Badań nad Energią zaprezentowali kilkanaście koncepcji na ponowne wykorzystanie tego gazu. Każda z nich jak na razie jest w fazie badań i każda jest na innym pułapie poznania. Poniżej przedstawiony jest pomysł, który w niedługim czasie zacznie odgrywać kluczową rolę w budowaniu gospodarki niskoemisyjnej. Takim alternatywnym rozwiązaniem, niepolegającym na mechanizmie magazynowania lecz na procesie przekształcania CO₂ w jedną z form biomasy jest biologiczna sekwestracja przez mikroglony [14, 15, 21].

Do wytworzenia 1 kg s.m. glonów potrzeba ok. 2 kg CO₂ i stąd ogromne zainteresowanie wykorzystaniem ich do obniżenia emisji zanieczyszczenia gazowego z kłowni opalanych węglem [14,15]. Energia, która została zmagazynowana w roślinach została zdefiniowana jako energia biomasy. Energię w niej skumulowaną można odzyskać na drodze spalania. W procesie tym powstaje ditlenek węgla, który został zaabsorbowany przez rośliny, dlatego można uznać, iż spalanie jest procesem odwrotnym do fotosyntezy. Ilość ditlenku węgla zużywanego podczas fotosyntezy bilansuje się z ilością tego gazu emitowanego podczas spalania [32]. Wykres przedstawiający obieg CO₂ w procesie wykorzystywania biomasy obrazuje rysunek 1.



Rys. 1. Wykorzystanie biomasy mikroglonów

Obecnie na całym świecie z glonów produkuje się bardzo mało suchej biomasy, jej ilość określa się na poziomie 10 tys. ton na rok. O algach mówi się głównie jako o surowcu do produkcji biopaliw tymczasem to nie wszystko, co można uzyskać z alg wspomaganych ditlenkiem węgla. Poza produkcją biopaliw odbiorcami produktów z farm glonowych może być przemysł chemiczny, kosmetyczny a nawet spożywczy. Bowiem są one w stanie wytwarzać jedzenie oraz karmy dla zwierząt, dodatki do produktów spożywczych, leki, kosmetyki i nawozy [5,6]. Algi mogą też służyć jako źródło białek oraz wielu innych substancji chemicznych wykorzystywanych w przemyśle [30].

Rys. 2. Obieg CO₂ w procesie wykorzystywania biomasy jako OZE

2. WARUNKI HODOWLI MIKROGLONÓW

2.1. WYMAGANIA HODOWLANE

Zapewnienie odpowiednich warunków hodowlanych stanowi zadanie priorytetowe w celu osiągnięcia optymalnego wzrostu glonów. Niezbędne jest dostarczenie wymaganych ilości soli mineralnych, dwutlenku węgla, wody a także światła. Ważnym aspektem jest również utrzymanie temperatury w przedziale 20-30 °C. Wymagana temperatura zależy oczywiście od rodzaju wykorzystywanych mikroalg. Pierwiastki warunkujące prawidłowe funkcjonowanie systemu hodowlanego to przede wszystkim

azot, fosfor oraz żelazo. W celu zwiększenia efektywności procesu fotosyntezy zaleca się dodatkowe naświetlanie nocą. Dodatkową informacją jest fakt, iż w przypadku fosforu zalecane jest stosowanie jego nadmiaru, gdyż biogen ten tworzy z jonami żelaza trudno przyswajalne kompleksy [20]. Kolejnym czynnikiem wpływającym na efekty hodowlane jest pH. Optymalna wielkość mieści się w zakresie od 5 do 7. Zbyt wysokie bądź drastycznie niskie pH to czynnik powodujący zamieranie komórek omawianych organizmów poprzez zahamowanie czynności rozwojowych.

2.2. SYSTEMY PRODUKCJI BIOMASY GLONOWEJ

Systemy otwarte są najprostszym sposobem prowadzenia hodowli glonów. Oprócz sztucznie stworzonych na potrzeby produkcyjne wyróżniamy również naturalne, do których należą między innymi stawy, jeziora oraz laguny. Stworzone zbiorniki kształtem przypominają tor wyścigowy. Dzięki unikalnej budowie i zamontowanej turbinie z kołem łopatkowym woda z kultura alg i składnikami pokarmowymi wprawiana jest w ruch. Zabieg ten zapobiega sedymentacji biomasy. Głębokość kanału powinna mieścić się w granicach 0,3 m. Utrzymywanie płytkich głębokości przyczynia się do maksymalnego wykorzystania promieni słonecznych, które przenikają przez całą powierzchnię mieszaniny. W celu optymalizacji wydajności produkcyjnej dostarczanie składników pokarmowych i napowietrzanie dwutlenkiem węgla ma charakter ciągły. Równoległe do tych procesów następuje zbiór biomasy glonowej. Główną zaletą otwartych stawów jest prosta budowa i łatwość obsługi całego systemu. Ze względu na kontakt ze środowiskiem istnieje wiele czynników wpływających negatywnie na efektywność ekonomiczną hodowli alg. Należą do nich dyfuzja CO₂ do atmosfery a także ciągły ubytek wody poprzez odparowywanie. Istotną wadą jest także wymagana znaczna powierzchnia pod uprawę oraz brak możliwości kontrolowania całego przebiegu rozwojowego mikroalg, co bezpośrednio wpływa na niską wydajność i produkcję biomasy [27].

Zamknięte systemy zwane inaczej fotobioreaktorami (PBR) służą do prowadzenia kontrolowanych procesów hodowlanych. Dzięki szczelnej budowie umożliwiają monitoring zawartości m.in. dwutlenku węgla i tlenu. Poza wykorzystywaniem promieni słonecznych istnieje możliwość zamontowania dodatkowych systemów dostarczających światło. Istotną zaletą jest także możliwość regulacji temperatury jak i ciśnienia panującego wewnątrz reaktora. Wprowadzanie dodatkowych elementów wiąże się bezpośrednio ze zwiększeniem kosztów eksploatacyjnych. Jednakże przy prowadzeniu hodowli w fotobioreaktorach efektywność generacji biomasy glonowej wzrasta. Istotnym parametrem przemawiającym na korzyść prowadzenia hodowli PBR jest znacznie mniejsza powierzchnia wykorzystywana na hodowlę. Pośród PBR wyróżniamy fotobioreaktory panelowe, kolumnowe i cylindryczne [13].

3. MIKROGLONY JAKO POTENCJALNY SPOSÓB KONWERSJI CO₂

Liczne badania potwierdziły możliwość sekwestracji ditlenku węgla przez glony w fotobioreaktorach. Ogromne znaczenie w toku porównywania wyników ma sposób hodowli glonów. Znaczenie ma tutaj typ fotobioreaktora, stosowane pożywki naturalne bądź syntetyczne, forma cyrkulacji zawiesiny glonowej, temperatura procesu oraz źródło światła. Kluczową sprawą w stosowaniu zwiększanego stężenia ditlenku węgla w hodowli jest jego stymulujące działanie na szybkość fotosyntezy, a co za tym idzie wzmoczoną polifercję biomasy. Dodatkowo Erikson i in. mówią, że wydajność fotobioreaktorów w sekwestracji CO₂ jest zależna głównie od gatunków mikroglonów, stężenia ditlenku węgla w strumieniu powietrza wlotowego, a także konfiguracja reaktorów i warunki operacyjne [20]. W poszukiwaniu prostej metody usuwania CO₂ Yue i Chen wyizolowali i hodowali mikroalgi słodkowodne z rodzaju *chlorella*, które rosły przez okres sześciu dni. Przez reaktory w sposób ciągły przepuszczano powietrze z wielu różnych stężeniach CO₂. Protokół z badań ujawnił, że tempo wzrostu glonów było około 200% większe niż obserwowane w powietrzu [31]. W innej publikacji Merchuk i in. dowiedli, iż ilość gazu dostarczanego do reaktora jest najważniejszą zmienną w pracy reaktora. Ten parametr mocno wpływa na mieszanie cieczy, dystrybucję składników odżywczych do komórek i szybkość absorpcji CO₂. Chociaż zwiększone natężenie przepływu gazu zwiększa mieszanie, to zazwyczaj prowadzi do spadku efektywności wykorzystania CO₂ w bioreaktorach. Większość zamkniętych fotoreaktorów do produkcji mikroalg osiąga 30% skuteczność usuwania ditlenku węgla [19].

Czynnikiem, który wciąż przyczynia się do problemów w produkcji biomasy pozostaje zmienne pH hodowli [2], które jest przyczyną asymilowania CO₂ przez zawiesinę mieszaną w bioreaktorze [31]. Wahaniom odczynu można zapobiec poprzez dodawanie z zewnątrz ditlenku węgla do hodowli [20]. Nie rozwiązuje to jednak problemu limitowanej pojemności asymilacyjnej ditlenku węgla w pH wewnątrz reaktora.

G. Maliga i in. stosował fotobioreaktor rurkowy o pojemności 1000 l. Przeważającym gatunkiem były algi z rodzaju Coccoid Blue Green Algae, które wykazały 46% skuteczność wiązania ditlenku węgla [17]. Zupełnie inne wartości przedstawia M. Rasmussen, gdzie już przy 25% konwersji ditlenku węgla w reaktorze uzyskał on suchą masę glonów w ilości 4g/l·d, jednakże prowadził on hodowlę w stawie otwartym [21]. Badania prowadzone przez Indonezyjski Instytut Nauk wykazały, że glony mogą pochłonąć 90% CO₂ produkowanego przez kominy fabryczne [23]. Różnica między wynikami może być powodowana tym, iż w doświadczeniu wykorzystuje się czysty CO₂, a nie emitowany przez kominy fabryczne. Ponadto, podobne wyniki uzyskali Watanabe i in. po raz kolejny przez *Chlorella*[29], natomiast Hanagata i in. potwierdzili możliwości produkcyjne glonów zarówno dla *Chlorelli* jak i *Scenedesmus* [9]. W badaniu przeprowadzonym przez Chin i in. wykazano, że gatunek *Chlorella sp.*

mają większą zdolność do usuwania CO₂, ale niższą produktywność zaobserwowano przy niskiej koncentracji CO₂[4]. Przy wyższych stężeniach CO₂ wydajność biomasy była większa.

Wśród wielu decyzji związanych z systemem eliminacji emisji CO₂, te dotyczące konfiguracji i trybu pracy reaktora są podstawą do uzyskania lepszych rezultatów. Reaktory pionowe (kolumnowe) są małe, tanie i łatwe w eksploatacji, a dodatkowo umożliwiają wytworzenie warunków aseptycznych[20]. Ponadto są przez Merchuka i in. uważane za najlepsze realne opcje dla biologicznej sekwestracji CO₂ [19].

W innej publikacji Merchuk i in. dowiedli, iż ilość gazu dostarczanego do reaktora jest najważniejszą zmienną w pracy reaktora. Ten parametr mocno wpływa na mieszanie cieczy, dystrybucję składników odżywczych do komórek i szybkość absorpcji CO₂. Chociaż zwiększone natężenie przepływu gazu zwiększa mieszanie, to zazwyczaj prowadzi do spadku efektywności wykorzystania CO₂ w bioreaktorach. Większość zamkniętych fotoreaktorów do produkcji mikroalg osiąga 30% skuteczność usuwania ditlenku węgla. Jak twierdzi Beneman i in. główną tego przyczyną są straty CO₂ w wyniku tłoczenia spalin do reaktora [1]. Berenguel i in. zaproponowali sekwencyjność reaktorów a także zawracanie powstałego gazu, co może sprawić, że straty te mogą zostać zmniejszone. Zaprojektowali oni zamknięte obiegowe systemy wsadowe, aż do uzyskania pożądanego wychwytu CO₂ [2].

Powietrze wzbogacone o CO₂ w pożywcę hodowlanej, zazwyczaj jest dostarczane do układu poprzez system barbotażowy. Procedura nie jest skuteczna pod względem ekonomicznym, ponieważ podczas transportu, dochodzi do znacznego marnotrawstwa gazu do atmosfery [3]. Ekonomiczne aspekty hodowli mikroglonów z jednoczesną konwersją ditlenku węgla zostały opisane w wielu artykułach [22]. Koszty to przede wszystkim inwestycja w systemy hodowlane (otwarte stawy bądź fotobioreaktory), dostawa gazu, dyfuzory oraz urządzenia do separacji powstałej biomasy, a także koszty eksploatacyjne głównie energia elektryczna do zasilania procesu. Koszty te jednak mogą zostać odzyskane ze sprzedaży zebranej biomasy m.in. na biopaliwa, pasze, barwniki oraz ze współspalania. Poprzez integrację hodowli mikroglonów z oczyszczaniem ścieków oraz wykorzystanie ciepła z procesów przemysłowych np. do suszenia biomasy glonów można podnieść wydajność ekonomiczną procesu [8].

4. PODSUMOWANIE

Biologiczne metody sekwestracji ditlenku węgla wykazują wysoki potencjał w procesach i strategiach zmierzających do łagodzenia zmian klimatu. Potencjał mikroalg został zbadany w licznych programach unijnych, w których środki były przeznaczone na redukcję emisji CO₂ i innych gazów cieplarnianych. Ze względu na możliwości zostały opracowane różne metody przemysłowe do hodowli mikroalg.

W większości nie są obecnie opłacalne, zwłaszcza w dużej skali. Ograniczenia tych systemów to: niezbyt wydajna produktywność, drogie instalacje, duża powierzchnia użytkowa, wysokie zapotrzebowanie na wodę. Obecne za najefektywniejszą uznaje się technologię komercyjnego wykorzystania hodowli glonów w roztworze wody w pionowych bioreaktorach. Hodowla mikroalg ma jednak wiele zalet w stosunku do tradycyjnych metod sekwestracji węgla - przede wszystkim możliwość zastosowania biomasy o wysokiej kaloryczności w produkcji energii.

LITERATURA

- [1] BENEMANNJ., TILLET D., WEISSMANJ., *Microalgae biotechnology*, Trends in Biotechnology, 1987, Vol. 5, No.2, 47–53.
- [2] BERENGUEL M., RODRIGUEZ F., ACIÉN F., GARCIA J., *Model predictive control of pH in tubular photobioreactors*, Journal of Process Control, 2004, Vol.14, No.4, 377–387.
- [3] CARVALHO A., MALCATA F., *Transfer of Carbon Dioxide within Cultures of Microalgae: Plain Bubbling versus Hollow-Fiber Modules*, Biotechnology Progress, 2001, Vol.17, No.2, 265–272.
- [4] CHIUSH.Y., KAOCH.Y., CHENCH.H., KUANT.CH., ONGS.CH., LINCH.SH., *Reduction of CO₂ by a high-density culture of Chlorella sp. in a semi continuous photobioreactor*, Bioresource Technology, 2008, Vol.99, No. 9, 3389–3396.
- [5] DEMIRBAS A., *Biorefineries: Current activities and future developments*, 2009 : Energy Conversion and Management, 2009, Vol. 50, No. 11 (2782–2801).
- [6] DEMIRBAS M., *Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review*, Applied Energy, Special Issue of Energy from algae: Current status and future trends, 2011, Vol.88, No.10 (3473–3480).
- [7] ERIKSEN N., RIISGARD F., GUNTER W., IVERSEN J., *On-line estimation of O₂ production, CO₂ uptake, and growth kinetics of microalgal cultures in a gastight photobioreactor*, Journal of Applied Phychology, 2007, Vol.19, No. 2, 161–174.
- [8] FARRELLY D., EVERARD C., FOGAN C., MCDONNELL K., *Carbon sequestration and the role of biological carbon mitigation: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, Vol. 21, 712–727.
- [9] HANAGATA N., Hanaga N., Takeuchi T., Fukuju Y., Barnes D., Karube I., *Tolerance of microalgae to high CO₂ and high temperature*, Phytochemistry, 1992, Vol. 31, 3345–3348.
- [10] HERZOG H. GOLOMB D. *Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use*, Encyclopedia of Energy, 2004, Tom 1, Article Number: NRGY : 00422.
- [11] HUIJGEN W., COMANS R., *Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation*. ECN, 2003.
- [12] JAWORSKI J., *Fotosynteza i mineralne nawożenie CO₂ a przyrost biomasy roślin*, Śląski Ogród Botaniczny.
- [13] JORQUERA O., KIPERSTOKA., SALESE., EMBIRUÇUM., GHIRARDIM., *Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors*, Bioresource Technology, 2010, Vol.104, No. 4 1406–1413.
- [14] KRZEMIENIEWSKI M., DĘBOWSKI M., ZIELIŃSKI M., *Glony jako alternatywa dla lądowych roślin energetycznych*. Czysta Energia, Olsztyn 2009, Tom 9.
- [15] KUMARA K, DASGUPTA CH., NAYAK B., LINDBLAD P., DAS D., *Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria*, Bioresource Technology, 2011, Vol.102, No. 8, 4945–4953.
- [16] LEWANDOWSKI J., *Analiza termodynamiczna fotosyntetycznego procesu koncentracji i biokonwersji energii promieniowania słonecznego w energię chemiczną związków węgla*. Wrocław 2007.

- [17] MALIGA G., SKŁADZIEN J., SZYMKÓW J., *Sekwestracja ditlenku węgla przez mikroglony*, Inż. Ap. Chem. 2010, 49, 4, 46-47.
- [18] MARZEC A., *Nadmierna emisja dwutlenku węgla towarzysząca spalaniu kopalnych surowców energetycznych i możliwości jej redukcji*. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków 2001. Tom Sympozycja i Konferencje, Tom 52.
- [19] MERCHUK J., ROSENBLAT Y., BERZIN I., *Fluid flow and mass transfer in a countercurrent gas-liquid inclined tubes photo-bioreactor*, Chemical Engineering Science, 2007, Vol. 62, No. 24, December 7414-7425.
- [20] MOLINA GRIMA E., FERNÁNDEZ F., CAMACHO F., CHISTI Y., *Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup.*, Journal of Biotechnology, Progress in Industrial Microbiology, 1999, Vol. 3, 231-247.
- [21] PACKER M., *Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy*. Energy Policy, 2009, Vol. 37, No. 9, 3428-3437.
- [22] RAJAGOPAL D., ZILBERMAN D., Review of environmental, economic and policy aspects of biofuels, *World Bank Policy Research Working Paper No. 4341*, Berkeley 2007.
- [23] TAKAHASHI S. MURATA N., *How do environmental stresses accelerate photoinhibition*, Trends in plant science, 2008, Vol.13, No.4, 178-182.
- [24] TARKOWSKI R., *Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla z energetyki w Polsce*, Polityka Energetyczna, Wrocław 2003, Tom 6, Zeszyt specjalny.
- [25] TARKOWSK R., *Podziemne składowanie CO₂ w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych)*, Wyd. IGSMiE, Kraków 2005.
- [26] TARKOWSKI B., ULIASZ-MISIAK R., *Możliwości podziemnego składowania CO₂ w Polsce w głębokich strukturach geologicznych*; Przegląd Górniczy, 2002.
- [27] UGWU C.U., AOYAGI H., UCHIYAMA H., *Photobioreactors for mass cultivation of algae*, Bioresource Technology, 2008, Vol. 99, 4021-4028.
- [28] ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., MAZURKIEWICZ M., MOKRZYCKI E., PIOTROWSKI Z., *Utylizacja ditlenku węgla poprzez mineralną karbonatyzację*. Wyd. Instytut GSMiE PAN, Kraków 2004. Tom Polityka Energetyczna, Tom 7.
- [29] WATANABE Y., OHMURA, N., SAIKI H., *Isolation and determination of cultural characteristics of microalgae which functions under CO₂ enriched atmosphere*, Energy Conversion and Management, 1992, Vol. 33, No. 5-8, 545-552.
- [30] WĄDRZYK M., JAKÓBIEC J., *Proces pirolizy mikroalg jako alternatywny sposób pozyskania ciekłego biopaliwa*, Acta Agrophysica, 2011, 17(2), 405-419.
- [31] YUE L., CHEN, W.; *Isolation and determination of cultural characteristics of a new highly CO₂ tolerant fresh water microalgae*, Energy Conversion and Management, 2005, Vol. 46, No.11-12, 1868-1876.
- [32] ZUWAŁA J., *Elektrociepłownie z nowymi jednostkami współpalającymi biomasę – metodologia bilansowania i rozliczeń energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, Wydawnictwo SIGMA-NOT, ISSN 0137-3676, Zabrze 2006. R. 37, nr 5, 3-7.

OPTIMIZATION OF BREEDING OF ALGAE IN THE DIRECTION OF INCREASING THE EFFICIENCY OF CO₂ ABSORPTION - A REVIEW OF METHODS OF SEQUESTRATION

Global warming, which is a result of anthropogenic emissions of carbon dioxide, resulted in on the one hand the desire to reduce its production, and on the other the creation of various storage concepts.

There are ideas to dissolve the carbon dioxide in water or pumped into disused mines. This causes some concerns about the stability and tightness of such a solution. Limiting carbon dioxide emissions may take place as a result of the use of this gas to a dynamic production algae biomass. Microalgae are very interesting, first and foremost, because they have a valuable property of absorption of oxides of nitrogen and carbon and produce pure oxygen and nitrogen. Formula based on biological binding carbon dioxide by microalgae, is considered as a potential way to reduce CO₂ emissions, but also biomass can be used to produce green energy. The purpose of work is to review the methods of carbon sequestration as well as showing the effects of this process on the performance biomass production of microalgae.