

Analiza możliwości zastosowania alg w procesie usuwania CO₂ z wykorzystaniem metodyki LCA

Analysis of the possibility of algae application in the process of CO₂ removal with the use of the LCA methodology

Polityka Unii Europejskiej, a w konsekwencji także Polski, od kilku lat skierowana jest na redukcję gazów cieplarnianych emitowanych do powietrza [1-2]. Gazem odpowiadającym w około 50% za występowanie efektu cieplarnianego, nie wliczając pary wodnej, jest ditlenek węgla [3]. Gazy cieplarniane powstają zarówno w trakcie naturalnie zachodzących procesów, np. erupcja wulkanów, jak i w wyniku działalności człowieka. Przykładem jest produkcja energii użytecznej z wykorzystaniem paliw kopalnych. Dla redukcji emisji CO₂ z omawianego procesu pojawiają się również wariantowe możliwości technologiczne tego typu rozwiązań. Rozpowszechnioną metodą eliminacji bezpośredniej emisji CO₂ jest zastępowanie w całości lub częściowo stosowanych w procesach produkcji energii paliw kopalnych biomasą. Realizacja procesów współspalania biomasy pozwala na uzyskanie korzystnych efektów środowiskowych w pełnym cyklu życia, zwłaszcza w przypadku biomasy pochodzenia odpadowego [4]. Analiza porównawcza efektów środowiskowych towarzyszących procesom spalania i współspalania biomasy wskazuje dodatkowo na najniższe zużycie energii na potrzeby własne układu paliwo-powietrze-spaliny w przypadku zastosowania technologii współspalania biomasy w kotle z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym [5].

Oprócz częściowego lub całkowitego zastępowania paliwa kopalnego biomasą dla usuwania CO₂ pochodzącego z paliw kopalnych stosuje się również tzw. metody post-combustion [6]. Najbardziej popularną jest tutaj metoda absorpcji chemicznej [3]. Bazuje ona na wykorzystaniu roztworu amin do pochłaniania ditlenku węgla [7]. Należy podkreślić, że metoda wiąże się z wykorzystaniem dla celów wychwytywania CO₂ związków chemicznych – w odróżnieniu do wzbudzającej coraz większe zainteresowanie naturalnej metody redukcji CO₂ przez zastosowanie do tego celu alg.

Algi jako rośliny do celów fotosyntezy wykorzystują CO₂. W porównaniu z innymi roślinami poziom wychwytu CO₂ w ich przypadku jest szczególnie wysoki. Najlepsze rezultaty odnotowuje się dla mikroalg. Hodowla alg wymaga poniesienia nakładów inwestycyjnych w postaci budowy specjalnej infra-

struktury opartej na fotobioreaktorze lub na otwartym kanale – w postaci stawu.

W przypadku zastosowania biomasy z celowych upraw energetycznych dodatkowa infrastruktura nie jest wymagana, istnieje natomiast konieczność ponoszenia w okresach wzrostu i uprawy dodatkowych nakładów energetycznych związanych z cyklicznymi zabiegami agrotechnicznymi. Należy zauważyć jednocześnie, że w odróżnieniu od klasycznej biomasy alg w kolejnym etapie mogą zostać efektywnie wykorzystane do produkcji wysokiej jakości biopaliw, np. olejów pirolitycznych. Chcąc lepiej zbadać efekt ekologiczny instalacji redukującej CO₂ z gazów przy wykorzystaniu mikroalg przeprowadzono analizę LCA.

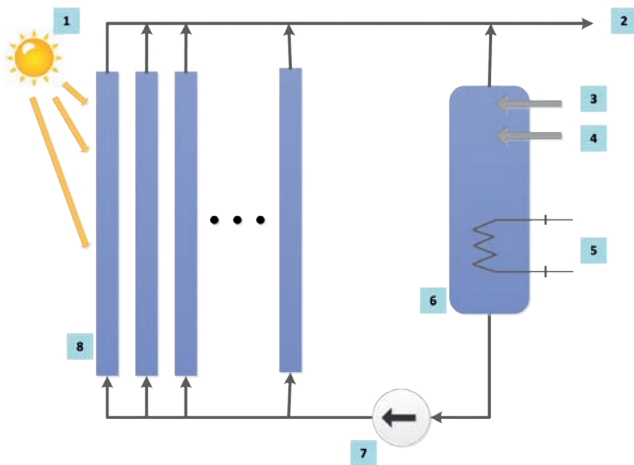
Analiza LCA wykorzystania alg do usuwania CO₂ z gazów

Określenie celu i zakresu analizy

Analizie poddano układ wykorzystujący fotobioreaktor wykonany z przezroczystego materiału. Został on umieszczony w szklarni, która umożliwiła zachowanie odpowiedniej temperatury w jego wnętrzu. Założono, że układ wyposażony jest w pompę obiegową. Zużyta energia wykorzystywana na potrzeby napędu pompy pochodziła z krajowego systemu elektroenergetycznego, cechującego się określonymi wielkościami emisji substancji szkodliwych do otoczenia. Obliczono powstałe w wyniku produkcji wspomnianej ilości elektryczności emisje. Instalacja posiadała również system kontroli temperatury i chłodzenia, dla którego emisje przyporządkowane zostały do obiektu energetycznego, z którym współpracuje instalacja. Wartości wpływające na zmianę klimatu pomniejszono o usunięte CO₂ w wyniku działania instalacji. Założono, że horyzont czasowy wyniesie 1 rok.

Badania przeprowadzono dla kilku gatunków alg z zamiarem określenia optymalnego gatunku mającego najlepszy wpływ na usuwanie CO₂ z gazów. Schemat analizowanego układu mającego za zadanie redukcję CO₂ przedstawiono na rysunku 1.

¹⁾ e-mail: mbalazinska@ichpw.pl



Rys. 1. Schemat fotobioreaktora rurowego do uprawy mikroalg:
 1 – Słońce, 2 – zbiór alg, 3 – doprowadzenie świeżego podłoża hodowlanego, 4 – system doprowadzania ditlenku węgla i regulacji ciśnienia, 5 – system kontroli temperatury i chłodzenia, 6 – zbiornik ciemny, 7 – pompa, 8 – przezroczysty zbiornik, w którym algi wystawione są na działanie słońca

Fig. 1. Photobioreactor for the cultivation of algae:
 1 – sun, 2 – collection of algae, 3 – fresh culture medium supply, 4 – carbon dioxide supply system and pressure regulation, 5 – temperature control and cooling system, 6 – dark tank, 7 – pump, 8 – transparent tank in which the algae are exposed to the sun

Analiza zbioru wejść i wyjść (Life Cycle Inventory – LCI)

Założono, że fotobioreaktor, w którym hodowane były algi charakteryzował się średnicą 30 cm. Rury ułożono poziomo co 70 cm, natomiast na ścianę pionową o wysokości 2,3 m składało się 5 rur. Rozpatrywany kanał umieszczony został w szklarni umożliwiającej zachowanie odpowiedniej temperatury. Układ wyposażony został w pompę obiegową o natężeniu przepływu do 12 m³/h oraz o mocy 0,04 kW. W związku z tym pompa, a w konsekwencji układ zużywał 346,8 kWh w ciągu roku. Założono, że jeden cykl wzrostu alg to 8 dni. Analizę przeprowadzono dla ośmiu wariantów obliczeniowych, gdzie każdy wariant odpowiadał kolejnemu gatunkowi alg. Uwzględnione gatunki to:

- Chlorella sp.,
- Chlorella kessleri,
- Scenedesmus sp.,
- Chlorella vulgaris,
- Botryococcus braunii,
- Haematococcus pluvialis,
- Scenedesmus obliquus,
- Spirulina sp..

Dla każdego z wymienionych gatunków alg znany był przyrost w ciągu dnia wynikający z pochłaniania CO₂ z gazów wyrażony w g/(l.dzień) [8]. Jednocześnie znany był poziom usuwania ditlenku węgla dla kolejnych gatunków wyrażony w g_{CO₂}/(l.dzień) [8], co zestawione zostało w tabeli 1.

Dla porównania warto przytoczyć wyniki badań nad hodowlą alg, które prowadzone były w IChPW. Hodowane były dwa gatunki alg, tj. Chlorella vulgaris oraz Nannochloropsis gaditana, każdy w układzie fotobioreaktora (rys. 2, 3).



Rys. 2. Hodowla mikroalg z gatunku Chlorella vulgaris

Fig. 2. Breeding of the species of microalgae Chlorella vulgaris



Rys. 3. Hodowla mikroalg z gatunku Nannochloropsis gaditana

Fig. 3. Breeding species of microalgae Nannochloropsis gaditana

Gatunek Chlorella hodowano w reaktorze o objętości 15 l, natomiast gatunek *Nannochloropsis* w reaktorze o pojemności 1,5 l. Różnica pomiędzy analizowanym przypadkiem a badaniami prowadzonymi w Instytucie wynika z faktu, że reaktory w IChPW były doświetlane sztucznym światłem. W związku z tym można się spodziewać, że wartości pochłanianego CO₂ wyrażone w g_{CO₂}/(l.dzień) będą wyższe niż dla analizowanego przypadku (tab. 1).

W rezultacie badań prowadzonych w IChPW na hodowli alg uzyskano porównywalne wartości poziomu usunięcia CO₂ do w odniesieniu do wartości literaturowych [24].

Przytoczone wielkości pozwalają wyznaczyć stosunek masy usuniętego CO₂ w odniesieniu do przyrostu masy alg ($\frac{g_{CO_2}}{g_{\text{przyrostu alg}}}$). Średnio dla mikroalg przypada 1,866 g_{CO₂}/g_{przyrostu alg}. Dysponując wymiarami kanału obliczono jego objętość. W następnej kolejności znając przyrost alg w ciągu jednego dnia oraz objętość fotobioreaktora obliczono całkowity przyrost alg znajdujących się w fotobioreaktorze w ciągu roku. W następnym kroku wyznaczono masę pochłoniętego CO₂ dla każdego gatunku alg.

Realizacja analizy wymagała znajomości ilości poszczególnych substancji szkodliwych emitowanych do otoczenia w wyniku produkcji energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym. Na podstawie dostępnych danych literaturowych [9-13]

Gatunek alg	Fotobioreaktor / reaktor otwarty	Temperatura hodowli, °C	Zawartość procentowa CO ₂ w strumieniu gazów kierowanych do oczyszczenia lub jeśli brak podobnych danych określenie formy strumienia gazów (powietrze/spaliny)	Pochłaniane CO ₂ , g _{CO2} / (l-dzień)
dane literaturowe [24]:				
Botryococcus braunii	brak danych	25	10	0,050
Botryococcus braunii	brak danych	25	spaliny	0,144
Chlorella sp.	fotobioreaktor	26	powietrze	1,273
Chlorella sp.	fotobioreaktor	26	2	2,697
Chlorella sp.	fotobioreaktor	26	5	1,678
Chlorella sp.	fotobioreaktor	26	10	0,198
Chlorella sp.	fotobioreaktor	26	15	0,185
Chlorella kessleri	fotobioreaktor	30	18	0,162
Chlorella vulgaris	fotobioreaktor	27	15	0,624
Chlorella vulgaris	brak danych	25	10	0,196
Chlorella vulgaris	fotobioreaktor	25	powietrze	0,075
Chlorella vulgaris	fotobioreaktor	25	powietrze	0,045
Haematococcus pluvialis	fotobioreaktor oraz staw	20	16-34	0,143
Scenedesmus obliquus	staw	b.d.*	powietrze	0,016
Scenedesmus obliquus	staw	b.d.*	powietrze	0,031
Scenedesmus obliquus	fotobioreaktor	30*	18	0,26
Scenedesmus sp.	brak danych	25	10	0,407
Scenedesmus sp.	brak danych	25	spaliny	0,379
Spirulina sp.	fotobioreaktor	30	12	0,413
badania Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla:				
Chlorella vulgaris	fotobioreaktor	25	4%	0,28
Chlorella vulgaris	fotobioreaktor	25	8%	0,30
Nannochloropsis gaditana	fotobioreaktor	25	4%	0,63
Nannochloropsis gaditana	fotobioreaktor	25	8%	0,68

* Brak danych

oszacowano na przykładzie roku 2011 średnie jednostkowe wskaźniki emisji ditlenku węgla, metanu oraz tlenu diazotu towarzyszące produkcji energii elektrycznej w Polsce. Umożliwiło to uzyskanie całkowitej wielkości emisji substancji szkodliwych powstałych w wyniku produkcji energii elektrycznej potrzebnej do pokrycia zapotrzebowania układu.

Ocena wpływu cyklu życia na środowisko (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)

Analizę LCA przeprowadzono dla kategorii zmiany klimatu, przy wykorzystaniu wartości wskaźników GWP100 (Global Warming Potential) przy założeniu horyzontu czasowego 100 lat [14]. W ocenie wpływu cyklu życia na środowisko uwzględniono wszystkie elementy obowiązkowe, tj. wybór kategorii wpływu, wskaźników kategorii, modeli charakteryzowania, klasyfikację oraz charakteryzowanie. Ponadto z elementów opcjonalnych przeprowadzono etap normalizacji. Wartości wskaźników normalizacji wykorzystane w obliczeniach przyporządkowane są do Europy Zachodniej (1995) [15]. Wyniki analizy przedstawiają wpływ na środowisko emisji substancji szkodliwych powstałych w wyniku funkcjonowania instalacji do hodowli alg, uwzględniający usunięte w wyniku zachodzącego w algach procesu fotosyntezy CO₂. Rezultaty badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Etapy oceny wpływu cyklu życia na środowisko kategorii zmiany klimatu dla instalacji fotobioreaktora rurowego wykorzystywanego do uprawy różnych gatunków alg

Table 2

Stages of Life Cycle Impact Assessment for category of climate change for tubular photobioreactor system used for cultivation of various species of algae

Wyszczególnienie	Charakteryzowanie	Normalizacja
	kg CO ₂ eq	IE* · rok
Chlorella sp.	-622013,64	-42,60
Chlorella kessleri	-83 504,26	-5,72
Scenedesmus sp.	-202 434,71	-13,87
Chlorella vulgaris	-120 907,05	-8,28
Botryococcus braunii	-49 799,27	-3,41
Haematococcus pluvialis	-72 911,26	-4,99
Scenedesmus obliquus	-52 688,27	-3,61
Spirulina sp.	-211 583,21	-14,49

* IE – Inhabitant Equivalent (równoważna liczba mieszkańców)

Interpretacja cyklu życia

Chcąc zinterpretować wyniki badań zaprezentowane w tabeli 2, należy zwrócić uwagę na fakt, że wyznaczone wartości liczbowe są ujemne. Wartość ujemna obrazuje korzyść dla środowiska wynikającą z wykorzystania alg do usuwania CO₂

z gazów. Największa korzyść dla środowiska przypada dla wykorzystania alg z gatunku *Chlorella* sp.

Chcąc zobrazować otrzymane wyniki badań wyznaczono hipotetyczną moc elektryczną obiektu energetycznego, który odpowiadałby możliwościom usuwania CO₂ ze spalin dla analizowanej instalacji hodowli alg. W tym celu na podstawie danych zawartych w pracy [3] wyznaczono średnią efektywność usuwania CO₂ wynoszącą 30,25%. W konsekwencji otrzymano masę CO₂, która produkowana byłaby przez wspomniany hipotetyczny obiekt energetyczny. W następnej kolejności należało przyporządkować obliczoną emisję CO₂ do odpowiadającej jej ilości wyprodukowanej energii elektrycznej dla typowego obiektu energetycznego. W konsekwencji określono wytworzoną energię elektryczną w ciągu roku, a następnie moc elektryczną hipotetycznego obiektu energetycznego. Rezultaty tych obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Hipotetyczna moc elektryczna obiektu energetycznego w zależności od gatunku alg

Table 3

Potential electric power of power plant depending on the algae kind

Gatunek alg	Usunięte CO ₂ w ciągu roku, kg CO ₂	Hipotetyczna moc elektryczna obiektu energetycznego*, kW
<i>Chlorella</i> sp.	622 290,35	295,00
<i>Chlorella kessleri</i>	83 780,97	39,72
<i>Scenedesmus</i> sp.	202 711,42	96,10
<i>Chlorella vulgaris</i>	121 183,76	57,45
<i>Botryococcus braunii</i>	50 075,98	23,74
<i>Haematococcus pluvialis</i>	73 187,97	34,70
<i>Scenedesmus obliquus</i>	52 964,98	25,11
<i>Spirulina</i> sp.	211 859,91	100,43

* Założono sprawność usuwania CO₂ dla alg 30,25%.

Analizując wyniki badań przedstawione w tabeli 4 zwraca uwagę zależność pomiędzy masą usuniętego CO₂ oraz mocą elektryczną hipotetycznego obiektu energetycznego. W związku z tym gatunkowi *Chlorella* sp., dla którego odnotowuje się największą masę usuniętego CO₂ w ciągu roku, można przyporządkować najwyższą moc elektryczną hipotetycznego obiektu energetycznego, która wynosi ponad 295 kW.

Podsumowanie

Prezentowany artykuł przedstawia rozważania nad wpływem na środowisko instalacji służącej do usuwania CO₂ z gazów odlotowych z zastosowaniem alg. Stanowi ona podstawę do

optymalnego doboru gatunku alg pod względem maksymalizacji poziomu redukcji CO₂ z gazów odlotowych.

Fotobioreaktor, w którym hodowane były algi umiejscowiony został w szklarni mającej korzystny wpływ na zachowanie odpowiedniej temperatury wewnątrz kanału. Przez kanał przepuszczane były gazy odlotowe, z których alg usuwały CO₂. Instalacja wyposażona była w urządzenia niezbędne do jej funkcjonowania (m.in. pompa obiegowa). Zużywały one w trakcie swojej pracy energię elektryczną, która obciążona była uśrednioną emisją charakterystyczną dla Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. W związku z tym analizie poddano wpływ instalacji na otoczenie w zakresie kategorii zmiany klimatu.

Otrzymane w rezultacie wyniki wskazują na znaczącą korzyść dla środowiska. Spośród ośmiu gatunków alg, które poddane zostały ocenie, najbardziej korzystny wpływ na środowisko wykazuje *Chlorella* sp. Wynika to z faktu, że w odniesieniu do innych gatunków alg charakteryzuje się ona najwyższą efektywnością procesu fotosyntezy. W konsekwencji przekłada się to na najwyższy stopień pochłaniania CO₂. W rezultacie algom z gatunku *Chlorella* sp. można przyporządkować potencjalnie największą moc hipotetycznego obiektu energetycznego, współpracującego z instalacją.

Uzyskane wyniki analizy alg odniesiono do poziomu redukcji CO₂ dla technologii absorpcji aminowej [16] oraz do wymaganych poziomów redukcji wskazanych przez Unię Europejską jako cel na lata 2020 i 2025 (tab. 4) [17-18].

Wartość redukcji CO₂ dla alg jest około trzy razy mniejsza niż dla przypadku absorpcji aminowej. Należy jednak mieć na względzie, że również po ich zebraniu można je efektywnie wykorzystywać. Algi po zastosowaniu w procesie pochłaniania CO₂ można zbierać, by w kolejnym etapie efektywnie wykorzystać je do produkcji wysokiej jakości olejów pirolitycznych. W zależności od typu pirolizy zmienia się ilość otrzymywanych produktów ciekłych. Dla pirolizy w złożu stałym ich wydajność jest mniejsza niż ma to miejsce w przypadku procesu szybkiej pirolizy. Dla wolnej pirolizy mikroalg udział produktów ciekłych waha się w zakresie 24-43% [19], natomiast dla szybkiej pirolizy podczas badań prowadzonych w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla otrzymano udział 50% produktów ciekłych [20]. Zwiększenie szybkości nagrzewania materiału umożliwi natomiast zwiększenie ilości otrzymywanych produktów ciekłych, które mogą być wykorzystywane do produkcji biopaliw.

Niewątpliwą zaletą alg jest możliwość ich efektywnego wykorzystania zarówno na etapie wzrostu do redukcji poziomu CO₂ z gazów odlotowych jak i po ich zebraniu, przykładowo do produkcji olejów pirolitycznych. Niewiele surowców może poszczycić się tak wszechstronnym zastosowaniem na różnych etapach życia.

Tabela 4

Wybrane poziomy redukcji ditlenku węgla z gazów odlotowych

Table 4

Selected reducing levels of carbon dioxide from flue gases

	Algi [opracowanie własne]	CCS – absorpcja chemiczna [16]	Cel [17-18]	
			2020 rok	2025 rok
Poziom redukcji CO ₂ , %	30,25	~81-97	85	90
Jednostkowy poziom redukcji CO ₂ , kgCO ₂ /kWh	0,291	0,778	0,817	0,865

- [1] Ustawa z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji, Dz.U. 2009 nr 130 poz. 1070.
- [2] Ustawa z dnia 12 grudnia 2012 r. o zmianie ustawy o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji oraz ustawy – Prawo ochrony środowiska, Dz.U. 2013, nr 0, poz. 139.
- [3] Kotowicz J., Janusz K., 2007, Sposoby redukcji emisji CO₂ z procesów energetycznych, *Rynek Energii*, 1, s. 10-18.
- [4] Zuwała J., 2012, Life Cycle Approach for Energy and Environmental Analysis of Biomass and Coal Co-firing in CHP Plant with Backpressure Turbine, *Journal of Cleaner Production* 35, p. 164-175.
- [5] Tokarski S., Głód K., Ściążko M., Zuwała J., *Ocena porównawcza efektów energetycznych współspalania i spalania biomasy w wybranych technologiach*, 12th International Conference on Boiler Technology, Szczyrk, 21-24 październik 2014.
- [6] Więclaw-Solny L., Ściążko M., *Absorpcyjne usuwanie CO₂ ze spalin kotłowych*, Konferencja „Technologie CCS dla energetyki”, Kraków, 5-6 listopada 2013.
- [7] Spietz T., Więclaw-Solny L., Tatarczuk A., Krótki A., Stec M., 2014, Technological modifications in pilot research on CO₂ capture process, *Chemik*, 68, 10, p. 884-892.
- [8] Brennan L., Owende P., 2010, Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, p. 557-577.
- [9] Biuletyn Urzędu Regulacji Energetyki, 88, 2, Warszawa 2014.
- [10] Gabrys H.L., 2014, Elektroenergetyka w Polsce 2014. Z wyników roku 2013 i nie tylko – osądy bardzo autorskie, *Energetyka. Problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej*, 720, 6, s. 321-323.
- [11] Garg A., Kazunari K., Pulles P., Volume 2: Energy, 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, eds Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [12] Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2011 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do emisji za rok 2014, Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2013.
- [13] Zuwała J., *Ocena efektów energetycznych i ekologicznych współspalania paliw kopalnych i biomasy w technologiach skojarzonych*, Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Nr 889, Katowice 2013.
- [14] *Intergovernmental Panel on Climate Change*, www.ipcc.ch (28.11.2014).
- [15] Guinée J.B. i in., *Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001.
- [16] Tatarczuk A., Ściążko M., Stec M., Tokarski S., Janikowski J., 2013, Carbon capture, wiedzieć jak najlepiej – nasz wspólny cel, *Chemik*, 67, 10, p. 897-902.
- [17] European Industrial Initiative on CO₂ Capture and Storage (CCS), Implementation Plan 2013-2015, Key actions to enable the cost-competitive deployment of CCS by 2020-25, 2012.
- [18] Decyzja Komisji z dnia 3 listopada 2010 r. ustanawiająca kryteria i środki dotyczące finansowania komercyjnych projektów demonstracyjnych mających na celu bezpieczne dla środowiska wychwytywanie i geologiczne składowanie CO₂ oraz projektów demonstracyjnych w zakresie innowacyjnych technologii energetyki odnawialnej realizowanych w ramach systemu handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych we Wspólnocie, ustanowionej dyrektywą 2003/87/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, 2010/670/UE.
- [19] Gierson S., Strezov V., G. Ellem, M. McGregor, J. Herberston, 2009, Thermal characterization of microalgae under slow pyrolysis conditions, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 85, p. 118-123.
- [20] Adamczyk M., 2014, *Badania procesów utylizacji ditlenku węgla w hodowlach mikroalg oraz badanie procesu pirolizy biomasy algowej w złożu stacjonarnym*. Sprawozdanie z wykonania pracy nr 102/2014, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla.
- [21] Demirbas A., 2011, Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems, *Applied Energy*, 88, p. 3541-3547.
- [22] Demirbas M. F., 2011, Biofuels from algae for sustainable development, *Applied Energy*, 88, p. 3473-3480.
- [23] Kadam K.L., 1997, Power plant flue gas as a source of CO₂ for microalgae cultivation: economic impact of different process options, *Energy Conversion and Management*, 38, p. 505-510.
- [24] Kleinová A., Cvengrošová Z., Rimarčík J., Buzetzi E., Mikulec J., Cvengroš J., 2012, Biofuels from microalgae, *Procedia Engineering*, 42, p. 231-238.
- [25] Schipper K., van der Gijp S., van der Stel R., Goetheer E., 2013, New methodologies for the integration of power plants with algae ponds, *Energy Procedia*, 37, p. 6687-6695.
- [26] Singh J., Gu S., 2010, Commercialization potential of microalgae for biofuels production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, p. 2596-2610.
- [27] Aroonwilas A., Tontiwachwuthikul P., 1997, Mass transfer studies of high performance structured packing for CO₂ separation process, *Energy Conversion and Management*, 38, Suppl., p. S75-S80.
- [28] Byeong-Yong Y., Sung-Geun L., Key-pyo R., Hee-Seung N., Ju-Mi P., 2011, New CCS system integration with CO₂ carrier and liquefaction process, *Energy Procedia*, 4, p. 2308-2314.
- [29] Göttlicher G., Pruschek R., 1997, Comparison of CO₂ removal systems for fossil-fueled power plant process, *Energy Conversion and Management*, 38, Suppl., p. S173-S178.
- [30] Matsumoto S., Yanagisawa Y., Inaba A., 1995, System analysis of CO₂ removal from thermal electric power plants and storage in deep sea, *Energy Conversion and Management*, 36, 6-9, p. 559-562.
- [31] Won-Joon C., Jong-Beom S., Sang-Yong J., Jong-Hyeon J., Kwang-Joong O., 2009, Removal characteristics of CO₂ using aqueous MEA/AMP solutions in the absorption and regeneration process, *Journal of Environmental Sciences*, 21, p. 907-913.
- [32] Skawińska A., Lasek J., Adamczyk M., 2014, Badanie procesów usuwania CO₂ przy udziale mikroalg, *Inż. Ap. Chem.*, 53, 4, s. 292-293.

