

Zofia LUBAŃSKA<sup>1</sup>  
Tomasz GRUDNIEWSKI<sup>2</sup>  
Marta CHODYKA<sup>3</sup>  
Jerzy NITYCHORUK<sup>4</sup>

## RODZAJE METOD SEKWESTRACJI CO<sub>2</sub>

Z pojęciem ochrony środowiska wiąże się bardzo szeroko w ostatnim czasie omawiane zagadnienie dotyczące ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>. Konsekwencją globalnych zmian klimatu wywołanego przez ludzi jest wzrost stężenia atmosferycznego gazów cieplarnianych, które powodują nasilający się efekt cieplarniany. Wzrasta na świecie liczba ludności, a co za tym idzie wzrasta konsumpcja na jednego mieszkańca, szczególnie w krajach szeroko rozwiniętych gospodarczo. Protokół z Kioto ściśle określa działania jakie należy podjąć w celu zmniejszenia stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Pomimo maksymalnej optymalizacji procesu spalania paliw kopalnianych wykorzystywanych do produkcji energii, zastosowania odnawialnych źródeł energii zmiana klimatu jest nieunikniona i konsekwentnie będzie postępować przez kolejne dekady.

Prognozuje się, że duże znaczenie odegra nowoczesna technologia, która ma za zadanie wychwycenie CO<sub>2</sub> a następnie składowanie go w odpowiednio wybranych formacjach geologicznych (CCS- Carbon Capture and Storage). Eksperci są zgodni, że ta technologia w niedalekiej przyszłości stanie się rozwiązaniem pozwalającym ograniczyć ogromną ilość emisji CO<sub>2</sub> pochodzącą z procesów wytwarzania energii z paliw kopalnych. Z analiz Raportu IPCC wynika, iż technologia CSS może się przyczynić do ok. 20% redukcji emisji dwutlenku węgla przewidzianej do 2050 roku [3]. Zastosowanie jej napotyka na wiele barier, nie tylko technologicznych i ekonomicznych, ale także społecznych.

Inną metodą dającą ujemne źródło emisji CO<sub>2</sub> jest możliwość wykorzystania obszarów leśnych o odpowiedniej strukturze drzewostanu. Środkiem do tego celu, oprócz ograniczenia zużycia emisjogennych paliw kopalnych (przy zachowaniu

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Zofia Lubańska, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 255; z.lubanska@dydaktyka.pswbp.pl

<sup>2</sup> Tomasz Grudniewski, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 909; gisbourne2@gmail.com

<sup>3</sup> Marta Chodyka, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 286; m.chodyka@dydaktyka.pswbp.pl

<sup>4</sup> Jerzy Nitychoruk, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Budownictwa, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 907; wnet.dziekan@pswbp.pl

zasad zrównoważonego rozwoju) może być intensyfikacja zalesień. Zwiększanie lesistości i prawidłowa gospodarka leśna należy do najbardziej efektywnych sposobów kompensowania antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub>.

W pracy omówiono najważniejsze metody sekwestracji CO<sub>2</sub> i przedstawiono krótką charakterystykę

**Słowa kluczowe:** pochłanianie, utylizacja CO<sub>2</sub>, ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>

## 1. Wstęp

Większość naukowców przyznaje, że faktem jest zaobserwowane ocieplenie się klimatu na Ziemi, które jest łączone z coraz częstszym występowaniem zjawisk ekstremalnych w różnych częściach świata. Niewątpliwie należy tu podkreślić często używany zwrot jakim jest globalne ocieplenie klimatu. Zmiany klimatu nie są zjawiskiem nowym, proces ten przebiega od początku istnienia świata. Obserwując ich pochodzenie, możemy je podzielić na zmiany naturalne i antropogeniczne, czyli takie, które są kształtowane przez wpływ człowieka. W historii istnienia globu zdarzały się okresy, gdy po zlodowaceniu następowało ocieplenie. Skoro w przeszłości klimat zmieniał się kilkakrotnie, można zadać pytanie, dlaczego istniejące zjawisko globalnego ocieplenia jest uważane za zagrożenie? Odpowiedź jest prosta, obserwowane zmiany, zachodzą zdecydowanie szybciej niż powinny. Potwierdzają to badacze z IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change), którzy informują, że w wyniku uwalniania się do atmosfery dużej ilości gazów cieplarnianych obserwujemy wzrost temperatury powietrza, jak i wody w oceanach, co prowadzi do globalnego ocieplenia. Prognoza na przyszłość nie jest obiecująca, przewiduje się coraz większe ocieplenie, które można ograniczyć poprzez zastosowanie różnych metod. W publikacji autorzy przedstawili krótką charakterystykę metody dotyczącej utylizacji dwutlenku węgla jaką jest sekwestracja.

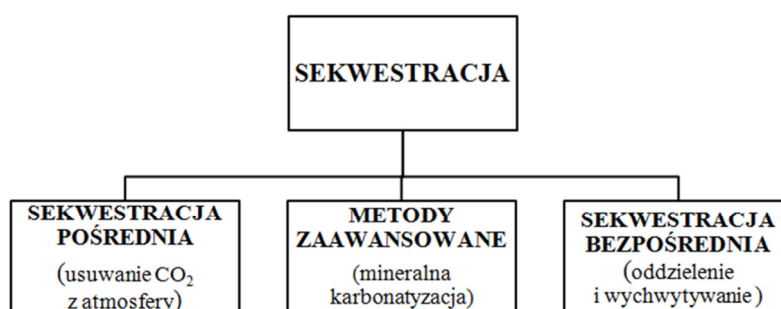
## 2. Metody sekwestracji

Ze względu na sposób przechowywania dwutlenku węgla oraz formy chemiczne, w jakich występuje węgiel w tych środowiskach, metody sekwestracji dzielimy na:

- uwięzienie w ekosystemach ziemskich – roślinach, które magazynują CO<sub>2</sub> poprzez proces fotosyntezy,
- sekwestracja morska,
- sekwestracja mineralna (karbonizacja),
- sekwestracja geologiczna.

Metody sekwestracji dzieli się na bezpośrednie, pośrednie oraz zaawansowane (rys.1). Sekwestracja bezpośrednia polega na wychwytywaniu dwutlenku węgla jeszcze przed jego emisją do atmosfery, następnym etapem jest składowanie go w bezpiecznych dla środowiska warunkach, w głębokich formacjach geo-

logicznych [1]. Natomiast sekwestracja pośrednia polega na usuwaniu dwutlenku węgla z atmosfery z wykorzystaniem roślin, które w procesie fotosyntezy przekształcają go w tlen, zapewniając utrzymanie równowagi gazowej atmosfery.



Rys. 1 Metody sekwestracji, na podstawie [2]

Fig.1 Sequestration Method, based on [2]

### 3. Sekwestracja pośrednia

Sekwestracja pośrednia jest jedną z metod, która zasługuje na szczególną uwagę. Opisanie poniżej metody znajdują zastosowanie w redukcji emisji dwutlenku węgla, pomimo tego, że wymagają zakupu nowoczesnych technologii do wychwytywania CO<sub>2</sub> z atmosfery oraz płacenia za jego magazynowanie np. w pokładach geologicznych. Zbyt mały natomiast nacisk kładzie się na rozwój naturalnych mechanizmów pochłaniania CO<sub>2</sub>, jakim może być intensyfikacja zalesień. Ekosystem (las) jest konserwowany, wzbogacany (uzupełniany) lub manipulowany w celu zwiększenia jego zdolności do magazynowania dwutlenku węgla. Sekwestracja przez biosferę jest szacowana na około 2 mln ton metrycznych na rok [1]. Zbiorowiska leśne pokrywają około 30% lądów, zajmując nieco ponad 4 mld ha, dalsze 24% przypada na grunty uprawne, pozostałe 46% to obszary bezleśne, pustynie, zurbanizowane.

### 4. Mineralna karbonizacja

Mineralna karbonatyzacja jako proces charakteryzuje się wieloma zaletami. Należy podkreślić, że jest to naturalny proces występujący w przyrodzie, w wyniku którego powstają termodynamicznie stabilne produkty, obojętne dla środowiska, a wiązanie jest trwałe, przez co nie ma zagrożenia dla środowiska; reakcja karbonatyzacji jest egzotermiczna, a powstała energia może być potencjalnie wykorzystana [6, 10].

Proces mineralnej karbonatyzacji poprzez wiązanie CO<sub>2</sub> w naturalnych surowcach mineralnych takich jak talk czy serpentyn jest zjawiskiem występującym w przyrodzie. Jest to jedna z reakcji, w wyniku której następuje starzenie

się skał w warunkach atmosferycznych [8]. Jest to jednak reakcja przebiegająca bardzo wolno. Zastosowanie surowców mineralnych występujących w przyrodzie znalazło uzasadnienie w procesie karbonatyzacji, jednej z metod sekwestracji dwutlenku węgla. Mineralami naturalnymi, które mogą być stosowane do sekwestracji CO<sub>2</sub> na drodze mineralnej karbonatyzacji są m.in.: serpentyn ( $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ), talk ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ), oliwin ( $Mg_2SiO_4$ ). Wśród odpadów, które można stosować wymieniły należy: popioły lotne, krzemiany wapniowe i magnezowe, odpady azbestowe, żużle hutnicze, masę Bayera [9, 7, 11].

Mineralna karbonatyzacja może być przeprowadzana dwiema podstawowymi metodami [12]:

- metodą bezpośrednią, w której minerał poddawany jest karbonatyzacji (metoda jednoetapowa),
- metodą pośrednią, w której składniki reaktywne są wstępnie ekstrahowane z matrycy mineralnej (pierwszy etap), a następnie są poddawane reakcji z CO<sub>2</sub> (drugi etap) – (metoda dwuetapowa).

W jednym i drugim przypadku może być stosowana wstępna obróbka materiałów, mająca na celu przyspieszenie reakcji CO<sub>2</sub>. Biorąc pod uwagę zastosowanie mineralnej karbonatyzacji jako metody sekwestracji CO<sub>2</sub> istnieją trzy możliwości jej aplikacji [12]:

- in-situ: podziemna mineralna sekwestracja CO<sub>2</sub> połączona z geologicznym magazynowaniem CO<sub>2</sub>,
- ex-situ: naziemny proces przemysłowy:
  - technologia końca rurociągu (CO<sub>2</sub> jest przetwarzane w stałe węglany, które są składowane w celu jego sekwestracji),
  - technologia zintegrowana z procesem (dotyczy to np. zastosowania CO<sub>2</sub> do produkcji materiałów budowlanych).

## 5. Sekwestracja bezpośrednia

### 5.1. Składowanie geologiczne

Istnieją dwie możliwości sekwestracji bezpośredniej dwutlenku węgla, są to: składowanie geologiczne oraz składowanie w oceanach. Potencjał magazynowania skorupy ziemskiej i oceanów jest bardzo ogromny [Tab.1] Wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla w strukturach geologicznych ma być przejściowe, do momentu opracowania technologii pozwalających na produkcję energii z paliw kopalnych, z jednoczesną redukcją lub eliminacją emisji CO<sub>2</sub>. Technologia CSS- Carbon Capture and Storage polega na wychwytywaniu dwutlenku węgla powstającego w wyniku spalania paliw kopalnych w procesach wytwarzania energii i innych procesach przemysłowych, a następnie jego długoterminowemu składowaniu w podziemnych formacjach geologicznych. Wychwycony, odseparowany z gazów spalinowych dwutlenek węgla musi zostać oczyszczony, następnie sprężony i przetransportowany do miejsca składowania.

Wśród technologii wychwytu i usuwania CO<sub>2</sub>, w zależności od umiejscowienia technologii w procesie spalania, wyróżnia się następujące rodziny procesów [4]:

- wyłapywanie i usuwanie CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych (post-combustion),
- separacja CO<sub>2</sub> z paliwa gazowego lub gazu syntezowego przed procesem spalania (pre-combustion),
- spalanie paliw w atmosferze tlenu z recyrkulacją CO<sub>2</sub>,
- separacja węgla z paliwa przed procesem spalania, np. proces Hydrocarb,
- wyłapywanie i usuwanie CO<sub>2</sub> w procesach wykorzystujących ogniwa paliwowe.

Najczęściej stosowaną metodą separacji CO<sub>2</sub> jest technologia z grupy post-combustion, między innymi absorpcja chemiczna i fizyczna, adsorpcja, separacja kriogeniczna lub membranowa. Zasadniczym problemem, wynikającym z sekwestracji dwutlenku węgla, jest sam proces wychwytywania, zarówno pod względem technicznym i finansowym (około 80% kosztów), pozostałe 20% kosztów związane jest z transportem oraz magazynowaniem CO<sub>2</sub> w strukturach geologicznych. Jako całość, proces technologiczny CCS jest rozwiązaniem nowym (etap demonstracyjny), ciągle jeszcze badanym. Praktycznie w mniejszej skali poszczególne etapy CCS znalazły już komercyjne zastosowanie w przemyśle chemicznym (wychwytywanie) i naftowym – transport i zatłaczanie dwutlenku węgla [5].

## 5.2. Składowanie w oceanach

Istnieją dwie możliwości oceanicznego składowania dwutlenku węgla. Pierwsza zakłada wtlaczanie gazu na małe odległości, aby uległ on rozpuszczeniu (do 1000m). W drugiej metodzie CO<sub>2</sub> jest wtlaczany na głębokość 3000 m, w taki sposób, aby utworzyć jezioro dwutlenku węgla. Pierwsza metoda powoduje wzrost zakwaszenia wody i tym samym negatywnie wpływa na lokalny ekosystem. Drugi sposób pozwala na zmagazynowanie gazu na znacznie dłuższy okres i odizolowanie go od środowiska morskiego (wokół „jeziora dwutlenku węgla” powstaje warstwa hydratu, który znacznie spowalnia proces rozpuszczania). Istnieje jednak niebezpieczeństwo uwalniania zmagazynowanego dwutlenku węgla w przypadku stopniowego ogrzewania się oceanów. W związku z tym, poza badaniami związanymi z opracowaniem nowych technologii separacji CO<sub>2</sub> ze strumieni gazów spalinowych, transportu oraz składowania, prowadzonych jest szereg prac nad konwersją CO<sub>2</sub> do paliw (lekkie węglowodory, takie jak metan czy metanol).

Tabela 1. Potencjał magazynowania oraz unieszkodliwiania CO<sub>2</sub> wg KohlmanaTable 1. Potential storage and disposal of CO<sub>2</sub> by Kohlmann

Miejsce składowania	Pojemność węgla [Gt]
Oceany, morza	>1000 <sup>4</sup>
Kawerny solne	100-1000
Wyeksploatowane zbiorniki gazu	>140
Wyeksploatowane zbiorniki ropy	>40
Wyeksploatowane pokłady węgla	10-100
Zatłaczanie z jednoczesnym odzyskiem ropy	65
Zalesianie	50-100

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono i krótko omówiono metody sekwestracji dwutlenku węgla. Technologia wychwytywania i sekwestracji węgla CCS może stać się ważną metodą redukcji emisji gazów cieplarnianych, jeżeli bariery technologiczne i regulacyjne zostaną przełamane. Sekwestracja dwutlenku węgla (CCS, Carbon Capture and Storage) to obiecująca technologia, która oferuje znaczny potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych w sektorach elektroenergetyki i przemysłu.

Mineralna karbonatyzacja jest interesującą alternatywą dla geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>. Wśród wad mineralnej karbonatyzacji przy zastosowaniu surowców naturalnych należy wymienić: wysokie koszty procesu związane z wydobyciem, przeróbką surowca naturalnego, jak również ze znaczącymi odległościami złóż od dużych emitentów CO<sub>2</sub>.

Na szczególne podkreślenie natomiast zasługuje pochłanianie dwutlenku węgla przez ekosystemy leśne. Priorytetem w działaniu na rzecz ochrony klimatu, nie tylko w bieżącym usuwaniu dwutlenku węgla, ale również w już zmagażymowanym, powinna być ochrona istniejących lasów. Koszty inwestycji technologii CCS, składowania w oceanach czy mineralnej karbonatyzacji są o wiele wyższe niż inwestycja w rozwój naturalnego mechanizmu jakim jest zalesianie terenów. Zalesianie terenów jest bardziej przyjazną środowisku metodą redukcji CO<sub>2</sub>, a lasy stanowią źródło biomasy.

## Literatura

- [1] [www.fe.doe.gov](http://www.fe.doe.gov) {dostęp 2016-05-14}.
- [2] Klara S.M.: Pathways to sustainable use of fossil energy. Carbon sequestration “The Path Forward”, Energy for the New Millennium, 2002, [www.netl.doe.gov](http://www.netl.doe.gov) {dostęp 2016-05-14}.
- [3] IPCC: report: “Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050”, ODCE 2008.
- [4] Dubiński J., Solik–Heliasz E., Uwarunkowania geologiczne dla składowania dwutlenku węgla [w:] Uwarunkowania wdrożenia zeroemisyjnych technologii węglowych w energetyce. Praca zbiorowa pod red. M. Ściążko. Wyd. IChPW, Zabrze 2007.
- [5] Gąsiorowska E.: Technologia CCS –szansa czy ślepa uliczka? Studia BAS Nr 1(21), s. 219– 236, 2010.
- [6] Goldberg i in. 2001 – Goldberg, P., Chen, Z.Y., O’Connor, W., Walters, R. i Ziock, H. 2001. CO<sub>2</sub> mineral sequestration studies in US. First National Conference on Carbon Sequestration. Washington, USA p. 14– 17 May 2001.
- [7] HUIJGEN W.J.J., COMANS R.N.J., – Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. ECN–Publications, 2003.
- [8] Huijgen W.J.J., Comans R.N.J.: Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. ECN–Publications, 2003.
- [9] FAUTH J.D., GOLDBERG P.M., KNOER J.P., SOONG Y., O’CONNOR W.K., DAHLIN D.C., NILSEN D.N., WALTERS R.P., LACKNER K.S., ZIOCK H.J., MCKELVY M.J., CHEN Z.Y., – Carbon dioxide storage as mineral carbonates. Division Fuel Chemistry, Vol. 45, No 4, 2000, p. 708–712.
- [10] Huijgen W.J.J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. feasibility of enhanced natural weathering as a CO<sub>2</sub> emission reduction technology. Thesis, Energy Research Centre of The Netherlands, 232 p., 2007.
- [11] MAZURKIEWICZ M., PIOTROWSKI Z., POMYKAŁA R., Zawiesina popiołowo–wodna jako środek transportu CO<sub>2</sub> do złóż kopalni podziemnych. Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami, Kraków, 2004.
- [12] KAKIZAWA M., YAMASAKI A., YANAGISAWA Y., A new CO<sub>2</sub> disposal process using artificial rock weathering of calcium silicate accelerated by acetic acid. Energy, Vol. 26, 2001, p. 341–354.

## TYPES OF METHODS OF CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION

### Summary

The concept of environmental protection involves very widely discussed issue concerning the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. The consequence of global climate change caused by humans is an increase of atmospheric concentrations of greenhouse gases which cause the intensifying greenhouse effect. The world population is increasing, and hence the consumption per capita is also increasing, especially in economically developed countries. The Kyoto Protocol sets out strict measures to be taken to reduce the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Despite maximum optimization of combustion of fossil fuels used for energy production, the use of

renewable energy, the climate change is inevitable and consequently will proceed over the next decades.

It is predicted that the modern technology which aims to capture CO<sub>2</sub> and store it in well-selected geological formations (CCS- Carbon Capture and Storage) will play an important role. Experts agree that in the near future this technology will become a solution to reduce the enormous amount of CO<sub>2</sub> emissions coming from energy production from fossil fuels. The analyses of the IPCC report show that the CSS technology can contribute to approximately 20% reduction in emissions of carbon dioxide by 2050 [3]. Its application faces obstacles, not only technological and economic, but also social.

Another method of giving a negative source of CO<sub>2</sub> emissions is the ability to use forest areas with suitable structure stand. The means to reach the aim, in addition to limited consumption of emission-generating fossil fuels (while maintaining the principles of sustainable development) may be the intensification of afforestation. Increasing afforestation and proper management of forests is one of the most effective ways to compensate of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions.

The paper discusses the main methods of CO<sub>2</sub> sequestration and presents a short overview.

**Keywords:** absorption, disposal of CO<sub>2</sub>, carbon sequestration, CO<sub>2</sub> emissions

DOI:10.7862/rb.2016.206

*Przesłano do redakcji: 27.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*