

KATARZYNA POBORSKA-MŁYNARSKA\*

## Wstępna ocena możliwości sekwestracji CO<sub>2</sub> w ługowniczych komorach solnych w Polsce

### Wprowadzenie

Sekwestracja dwutlenku węgla jest jedną z metod zmierzających do ograniczenia globalnego efektu cieplarnianego. Polega na wychwytywaniu i składowaniu (zatrzymywaniu) dwutlenku węgla w celu ograniczenia jego emisji do atmosfery (CO<sub>2</sub> Capture and Storage – CCS). Zagadnienie to jest od około pięciu lat przedmiotem międzynarodowych badań, których celem jest opracowanie technik wychwytywania ogromnych ilości dwutlenku węgla u źródeł jego powstawania (wytwarzanie energii i procesy przemysłowe) i ich składowania. Najczęściej wymieniane są dwie możliwości składowania: pod dnem morskim i w formacjach geologicznych (IPCC 2005; Tarkowski 2005; Tarkowski (red.) 2005; Wildenborg, Lokhorst 2005).

Sekwestracja w oceanach polega na głębokich iniekcjach CO<sub>2</sub> pod dnem oceanicznym (w osadach dennych).

Sekwestracja w formacjach geologicznych rozpatrywana była dotychczas w odniesieniu do kilku środowisk skalnych i polega na zdeponowaniu CO<sub>2</sub> w (Tarkowski 2005):

- złożach ropy naftowej i gazu ziemnego,
- w solankowych warstwach wodonośnych,
- w głęboko zalegających pokładach węgla, nie przeznaczonych do eksploatacji,
- w ługowniczych komorach solnych (Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002; IPCC 2005; Shi, Durucan 2005),
- innych ośrodkach geologicznych.

---

\* Katedra Górnicztwa Podziemnego AGH, Kraków; e-mail: kpm@agh.edu.pl

## 1. Składowanie w komorach solnych

Koncepcja składowania CO<sub>2</sub> w komorach ługowniczych w złożach soli stanowi jeden ze sposobów geologicznej sekwestracji, chociaż o mniejszym znaczeniu. Koncepcja ta została szczegółowo opracowana dla złóż solnych prowincji Alberta w Kanadzie (Bachu, Brulotte, Grobe, Stewart 2000; Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002) i została przedstawiona w kolejnych publikacjach (IPCC 2005; Shi, Durucan 2005).

Według autorów raportu IPCC Special Report on „Carbon dioxide Capture and Storage” (IPCC 2005), zagadnienie nie jest całkowitą nowością od strony technicznej. Przy składowaniu CO<sub>2</sub> w ługowniczych komorach solnych możliwe byłoby wykorzystanie znanych już technologii magazynowania np. gazu ziemnego lub sprężonego powietrza. Istotną różnicą jest czas utrzymania w komorze sprężonego gazu: dla CO<sub>2</sub> – mierzony setkami lat, a dla dotychczas magazynowanych gazów – w cyklu sprężanie-rozprężanie – od jednego dnia do roku.

Zalety składowania CO<sub>2</sub> w komorach ługowniczych to (IPCC 2005):

- możliwość wykorzystania znanych technologii magazynowania,
- duża wydajność składowania na jednostkę objętości (mierzona w kg CO<sub>2</sub> /m<sup>3</sup>),
- duże tempo zatłaczania,
- możliwość przemysłowego wykorzystania solanki.

Wadami są:

- stosunkowo mała pojemność składowania w pojedynczej komorze, a w związku z tym konieczność utworzenia szeregu komór składowych,
- konieczność zagospodarowania solanki pochodzącej z budowy komór i związane z tym problemy ekologiczne,
- ryzyko związane z uwolnieniem się gazu w przypadku zawodności systemu uszczelnienia komory.

Komory ługownicze mogą być użyte także jako magazyny tymczasowe dla CO<sub>2</sub>, tzn. jako magazyny służące do okresowego przechowywania dwutlenku węgla na drodze pomiędzy źródłem wytwarzania a miejscem jego ostatecznego składowania (IPCC 2005).

## 2. Właściwości dwutlenku węgla i wnioski dla składowania podziemnego

W normalnych warunkach ciśnienia i temperatury CO<sub>2</sub> jest gazem. W zmieniających się warunkach ciśnienia i temperatury dwutlenek węgla zmienia swój stan skupienia:

- w niskich temperaturach jest ciałem stałym,
- w miarę wzrostu temperatury sublimuje do stanu pary,
- poczynając od punktu potrójnego (temperatura = -56,5°C , ciśnienie = 0,51 MPa) do punktu krytycznego, w zależności od ciśnienia i temperatury może występować w stanie stałym, ciekłym albo gazowym,
- w temperaturze i przy ciśnieniu wyższym niż w punkcie krytycznym (temperatura = 31,1°C , ciśnienie = 7,39 MPa) CO<sub>2</sub> znajduje się w stanie nadkrytycznym tzw.

gęstej fazy gazowej; w punkcie krytycznym gęstość CO<sub>2</sub> jest równa 467 kg/m<sup>3</sup>; w zależności od temperatury i ciśnienia gęstość gazu może być rzeczywiście bardzo duża, może osiągać lub nawet przekraczać – przy odpowiednich ciśnieniach – gęstość wody.

Jak wynika z tych danych, stan skupienia i gęstość CO<sub>2</sub> zależą od temperatury i ciśnienia składowania. Jeżeli gaz będzie składowany pod ciśnieniem przekraczającym ciśnienie krytyczne, a temperatura górotworu na głębokości składowania przekroczy 31,1°C, to będzie on znajdował się w stanie nadkrytycznym. Składowanie w stanie nadkrytycznym jest korzystne ze względu na gwałtowny wzrost gęstości w okolicach punktu krytycznego.

Zatem czynniki, jakie należy wziąć pod uwagę określając stan fizyczny składowanego dwutlenku węgla to: temperatura górotworu i ciśnienie składowania CO<sub>2</sub>. Z kolei ciśnienie składowania uzależnione jest od:

- hydrostatycznego ciśnienia solanki na głębokości posadowienia komory,
- ciśnienia szczelinowania,
- ciśnienia litostatycznego na głębokości posadowienia komory.

Ciśnienie składowania decyduje o gęstości dwutlenku węgla przy danej temperaturze, czyli o faktycznej maksymalnej ilości składowanego gazu jaki może pomieścić komora o określonej objętości.

### **3. Badania nad możliwością składowania CO<sub>2</sub> w komorach ługowniczych w złożach soli kamiennej w Kanadzie**

Dotychczas jedyna szersza koncepcja składowania dwutlenku węgla w komorach ługowniczych została opracowana dla złoża soli kamiennej formacji Lotsberg Salt w środkowo-wschodniej części prowincji Alberta w Kanadzie (Bachu, Brulotte, Grobe, Stewart 2000; Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002). Autorzy koncepcji opracowali procedurę wykonania, testowania i wypełniania komory ługowniczej oraz długoterminową prognozę zachowania się komory i składowanego gazu podczas powolnego zaciskania się komory. W dalszej części rozdziału przedstawiono w skrócie zarys tej koncepcji.

**Złoże solne Lotsberg Salt** (Bachu, Brulotte, Grobe, Stewart 2000; Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002)

Złoże to zbudowane jest z warstw solnych należących do środkowodekańskiej grupy Elk Point. Jest rozległym poziomo zalegającym złożem czystej soli kamiennej, leżącym na głębokości 1100–1200 m, o grubości w centralnej części sięgającej 160 m. Przykryte jest zalegającym poziomo kompleksem skał nieprzepuszczalnych (piaskowce, łupki dolomity, sole, anhydryty) o grubości kilkuset metrów. Stwierdzono, że zarówno złożo, jak i jego nadkład są nieprzepuszczalne dla migracji wód i gazów.

### Założenia początkowe do projektowania i budowy komór solnych

(Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002)

1. Komora składowa będzie posadowiona na głębokości 1200 m, gdzie ciśnienie litostatyczne przy średniej gęstości skał równej  $2,4 \text{ Mg/m}^3$  wynosi 28 MPa.
2. Komora będzie ługowana tak, aby miała kształt kuli lub sferoidy o średnicy lub wysokości 80–100 m.
3. Jeśli komora będzie projektowana jako kula o średnicy 100 m, jej całkowita objętość będzie równa około  $500\,000 \text{ m}^3$ , a szacowana objętość czynna – około  $450\,000 \text{ m}^3$ .
4. Jeśli komora będzie projektowana jako sferoida z osią poziomą równą 150 m i osią pionową równą 100 m, czynna objętość komory będzie równa około  $1\,000\,000 \text{ m}^3$ .
5. Ponad stropem komory pozostawiony będzie stropowy filar o grubości 30–40 m, a poniżej spągu – filar spągowy o grubości ponad 10 m.
6. Komora powstanie w ciągu 24–30 miesięcy; będzie uzbrojona w koncentryczne kolumny rur ługowniczych albo też w dwie kolumny rur obok siebie, opuszczone do dna otworu.
7. Komora będzie wypełniona solanką, której ciśnienie hydrostatyczne na głębokości 1200 m będzie równe około 14 MPa.

### Napełnianie komory dwutlenkiem węgla (Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002)

Napełnianie komory będzie odbywać się zewnętrzną kolumną rur, podczas gdy wewnętrzną kolumną umieszczoną przy dnie komory solanka będzie wypierana. Temperatura i ciśnienie w komorze będą takie, że  $\text{CO}_2$  będzie znajdował się w stanie nadkrytycznym ( $35^\circ\text{C}$  i 14 MPa). Wypełnianie odbywać się będzie przy ciśnieniu hydrostatycznym solanki 14–15 MPa. Czas wypełniania zależy od ilości dostarczanego na bieżąco dwutlenku węgla ze źródeł regionalnych.

Przy ciśnieniu 15 MPa i temperaturze około  $35^\circ\text{C}$ , gęstość  $\text{CO}_2$  jest równa około  $0,81 \text{ g/cm}^3$ . Oznacza to, że w komorze o czynnej objętości  $450\,000 \text{ m}^3$  będzie można zmagazynować 364 500 Mg dwutlenku węgla.

Rozpatrywano dwie możliwości:

- zamknięcie i uszczelnienie komory przy ciśnieniu 15 MPa,
- dopełnienie komory dwutlenkiem węgla do ciśnienia 24 MPa, tzn. nieco poniżej ciśnienia litostatycznego przed uszczelnieniem komory.

Problem wielkości ciśnienia podczas wypełniania komory i po jej zamknięciu jest ważny ze względu na tempo i wielkość zaciskania komory na skutek pęcznienia soli kamiennej, a w konsekwencji zmniejszenie jej objętości. To z kolei ma wpływ na wielkość deformacji górotworu ponad komorą i na powierzchni.

Dla określenia geomechanicznego zachowania się górotworu i komory autorzy (Dusseault, Rothenburg, Bachu 2002) opracowali model geomechaniczny pozwalający na obliczenia ilościowe dotyczące szybkości zaciskania i reakcji powierzchni.

#### 4. Warunki w krajowych złożach wysadowych

Aby wstępnie ocenić możliwości składowania dwutlenku węgla w komorach ługowniczych wykonanych w jednym ze środkowopolskich wysadów solnych dokonano szacunkowych obliczeń przy następujących założeniach: zakłada się, że komora ługownicza będzie wykonana na głębokości 1500 m w modelowym wysadzie solnym, którego zwierciadło solne zalega na głębokości 400 m, a przykryte jest czapą gipsową o grubości 300 m i 100-metrowym nadkładem, jaki stanowią osady trzecio- i czwartorzędu.

Przyjęto więc dla wysadów solnych w Polsce środkowej (Ślizowski K. 1983):

- średni gradient geotermiczny wyznaczony dla nadkładu jako  $2,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,
- średni gradient geotermiczny wyznaczony dla soli jako  $1,46^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,
- średnioroczną temperaturę na powierzchni  $8^{\circ}\text{C}$ ,
- średni ciężar objętościowy nadkładu jako  $21,32\text{ kN/m}^3$ ,
- średni ciężar objętościowy soli jako  $21,07\text{ kN/m}^3$ ,
- ciężar właściwy solanki  $11,8\text{ kN/m}^3$ .

Wówczas na głębokości 1500 m:

- temperatura górotworu będzie równa  $34,46^{\circ}\text{C}$ ,
- ciśnienie litostatyczne będzie równe  $31\,705\text{ kN/m}^2 = 31,705\text{ MPa}$ ,
- ciśnienie hydrostatyczne solanki –  $17\,700\text{ kN/m}^2 = 17,700\text{ MPa}$ .

Wynikałoby stąd, że warunki ciśnienia hydrostatycznego solanki i temperatury po wykonaniu komory pozwalają na utrzymanie dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym.

Przyjmując dalej, że komora będzie miała w przybliżeniu kształt walca o średnicy 50 m i wysokości 800 m, objętość jej będzie równa  $1\,570\,000\text{ m}^3$ . Tylko część tej objętości będzie można wykorzystać do składowania, jako objętość czynną komory. Pozostała część będzie wypełniona częściami nierozpuszczalnymi i resztkową solanką, ponadto objętość komory rzeczywistej będzie pomniejszona w stosunku do projektowanej na skutek konwergencji. Przyjmując szacunkowo, że objętość czynna komory stanowić będzie  $2/3$  jej objętości projektowanej, wyniesie ona  $1\,046\,667\text{ m}^3$ .

Pod ciśnieniem rzędu 17 MPa gęstość dwutlenku węgla przekroczy  $0,81\text{ Mg/m}^3$  (wartość dla 15 MPa; Bachu, Brulotte, Grobe, Stewart 2000). Wynika stąd, że komora o tej objętości zdolna jest pomieścić co najmniej  $850\,000\text{ Mg CO}_2$  (850 Gg).

#### Podsumowanie

W kraju, roczna emisja  $\text{CO}_2$  powstającego w przemyśle energetycznym podczas produkcji energii ze spalania paliw stanowiła w 2005 r. ponad  $180\,563\text{ Gg}$  (Olendrzyński i in. 2007). Elektrownia „Konin” wyemitowała w roku 2002 ponad  $3000\text{ Gg CO}_2$  (Tarkowski, red. 2005). Oznacza to, że przy przyjętych założeniach, dla zmagazynowania dwutlenku węgla pochodzącego z elektrowni o zbliżonej rocznej emisji  $\text{CO}_2$ , potrzebne są 3–4 komory ługownicze.

Przy niewielkiej liczbie wadliwych złóż solnych, biorąc pod uwagę obecny stan ich zagospodarowania oraz plany zagospodarowania w przyszłości – głównie do budowy podziemnych magazynów paliw – należy uznać, że wykorzystanie w kraju ługowniczych komór solnych do składowania dwutlenku węgla jest mało prawdopodobne.

Artykuł został opracowany w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.100.27

#### LITERATURA

- Bachu S., Brulotte M., Grobe M., Stewart S., 2000 – Suitability of the Alberta Subsurface for Carbon-Dioxide Sequestration in Geological Media. Earth Sciences Report 00-11, Alberta Energy and Utilities Board, Alberta Geological Survey.
- Dusseault M.B., Rothenburg L., Bachu S., 2002 – Sequestration of CO<sub>2</sub> in Salt Caverns. Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference 2002, Calgary, Alberta, Canada, June 11–13.
- IPCC Special Report on "Carbon dioxide Capture and Storage", Intergovernmental Panel on Climate Change WMO UNEP, edited by: Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L. Working Group III, Cambridge University Press, 2005.
- Olendrzyński K., Kargulewicz I., Skośkiewicz J., i in., 2007 – Krajowa inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych za rok 2005. KASHUE, Instytut Ochrony Środowiska, Krajowe Centrum Inwentaryzacji Emisji.
- Shi J.Q., Durucan S., 2005 – CO<sub>2</sub> Storage in Caverns and Mines. Oil&Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 60, No 3, pp. 569–571.
- Ślizoński K., 1983 – Warunki geologiczno-górnictwa w cechsztyńskich złożach soli w Polsce dla wykonywania podziemnych zbiorników cieczy i gazu. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, nr 121.
- Tarkowski R., 2005 – Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub>. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- Tarkowski R., red., 2005 – Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych). Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- Wildenborg T., Lokhorst A., 2005 – Introduction on CO<sub>2</sub> Geological Storage. Classification of Storage Options. Oil&Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 60, No 3, pp. 513–515.

#### WSTĘPNA OCENA MOŻLIWOŚCI SEKWESTRACJI CO<sub>2</sub> W ŁUGOWNICZYCH KOMORACH SOLNYCH W POLSCE

#### Słowa kluczowe

Sekwestracja dwutlenku węgla, ługownicze komory solne, Polska

#### Streszczenie

Sekwestracja dwutlenku węgla jest jedną z technologii zmierzających do ograniczenia globalnego efektu cieplarnianego. Polega na wychwytywaniu i składowaniu (zatrzymywaniu) dwutlenku węgla w celu ograniczenia jego emisji do atmosfery (CO<sub>2</sub> Capture and Storage – CCS) (Tarkowski 2005). Zagadnienie to jest od około pięciu lat przedmiotem międzynarodowych badań, których celem jest opracowanie technik wychwytywania dwutlenku węgla u źródeł jego powstawania (wytwarzanie energii i procesy przemysłowe) i ich składowania. Najczęściej wymieniane są dwie możliwości składowania: pod dnem morskim i w formacjach geologicznych. Jedną z możliwości sekwestracji CO<sub>2</sub> w formacjach geologicznych jest jego składowanie w ługowniczych komorach solnych. Koncepcja ta oparta jest na doświadczeniach z magazynowaniem produktów naftowych,

LNG i innych. Ze względu na ograniczone objętości magazynowe komór, ma ona mniejsze znaczenie w porównaniu z innymi sposobami sekwestracji geologicznej. Koncepcja ta została szczegółowo opracowana dla złóż solnych formacji Lotsberg Salt w prowincji Alberta w Kanadzie, gdzie od kilku lat prowadzone są badania nad możliwością składowania CO<sub>2</sub> w komorach ługowniczych utworzonych w pokładzie solnym o grubości do 160 m, na głębokości około 1200 m.

W artykule – na podstawie literatury – przedstawiono zarys problematyki związanej z sekwestracją CO<sub>2</sub> w komorach ługowniczych, szczególnie pod kątem ich geologicznej lokalizacji, konstrukcji i przewidywanego zachowania się górotworu solnego w czasie długoterminowego składowania. Sformułowano też wstępny wniosek dotyczący możliwości zastosowania tej metody w krajowych złożach solnych, stwierdzając, że: przy niewielkiej liczbie wysadowych złóż solnych, biorąc pod uwagę obecny stan ich zagospodarowania oraz plany zagospodarowania w przyszłości – głównie do budowy podziemnych magazynów paliw – wykorzystanie w kraju ługowniczych komór solnych do składowania dwutlenku węgla jest mało prawdopodobne.

#### PRELIMINARY ASSESSMENT OF CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION POSSIBILITIES IN SALT CAVERNS IN POLAND

#### Key words

Carbon dioxide sequestration, salt caverns, Poland

#### Abstract

Carbon dioxide sequestration is one of the options of limiting the global greenhouse effect. It consists in carbon dioxide capture and storage to reduce its emission to the atmosphere (CO<sub>2</sub> Capture and Storage – CCS). The problem has been a subject of the international research to invent the techniques of the capture of the enormous amounts of CO<sub>2</sub> at the sources (power plants, industrial processes, etc.) and of the storage, for last ten years. The most often mentioned possibilities of storage are: the storage in oceans and in geological formations. One of the option of carbon dioxide sequestration in geological formations is the storage in salt caverns mined by solution mining. This option could use the technology developed for the storage of gas and petroleum products, LNG and compressed air. In comparison with another options of storage, this one is less important because of limited caverns' volume. However, from several years this option has been developed in detail for Lotsberg Salt formation in Alberta, Canada, where the research for possibility of CO<sub>2</sub> storage in salt caverns located at the depth of 1200 m in the salt deposit up to 160 m thick has been done.

In the article the option of CO<sub>2</sub> storage in salt caverns is presented on the basis of references and the possibility of employing this technique in polish salt deposits in general is discussed. The preliminary conclusion is, that because of limited number of salt domes in Poland and the historical-, present- and planned mining operation in salt domes, excluding other reasons (e.g. economic) – the applicability of this sequestration technique is rather unlikely in our country.