

Marcin LUTYŃSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

KONCEPCJA I UWARUNKOWANIA WYSOKOCIŚNIENIOWEGO SKŁADOWANIA CO₂ W NIECZYNNYCH KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcje wysokociśnieniowego składowania CO₂ w podziemnej kopalni węgla kamiennego jako jednego ze sposobów na zmniejszenie emisji tego gazu do atmosfery. Przedstawiono przykłady oraz koncepcje kopalń zamienionych na magazyn gazu ziemnego. Ponadto, podano uwarunkowania, jakie muszą być spełnione, aby można było składować CO₂ w podziemnej kopalni węgla kamiennego.

CONCEPT AND FEASIBILITY OF CO₂ HIGH PRESSURE STORAGE IN ABANDONED COAL MINES

Summary. The paper presents the concept and feasibility of CO₂ high pressure storage in abandoned coal mines as one of the CO₂ sequestration methods. The examples of existed mines converted into gas storage sites were presented. The feasibility study and storage modes of CO₂ in abandoned coal mines were described.

1. Wprowadzenie

Według raportu Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) zużycie energii pierwotnej w 2030 roku będzie o 60 % większe niż w 2002. Jednakże, 85 % pierwotnej energii będzie pochodzić ze spalania paliw kopalnych, co w konsekwencji zwiększy emisje gazów cieplarnianych, a w szczególności dwutlenku węgla, o około 63 % w porównaniu z dzisiejszym poziomem. Zwiększona emisja dwutlenku węgla przyczynia się w znacznym stopniu do globalnego ocieplenia klimatu ziemi i szeregu niebezpiecznych następstw z tym związanych. Obecnie coraz większą uwagę skupia się na redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery, m.in. poprzez wdrażanie projektów mających na celu wychwycenie dwutlenku

węgla, a następnie bezpieczne jego składowanie. Działania te zostały wymuszone poprzez tzw. protokół z Kyoto, który podpisała większość rozwiniętych państw, w tym wszystkie kraje Unii Europejskiej. Unia Europejska zobowiązała się do ograniczenia emisji CO₂ w przeciągu lat 2008–2012 o 8 %. Wobec braku alternatywnych źródeł energii dla paliw kopalnych, opcja sekwestracji, czyli wychwytywania, a następnie bezpiecznego składowania dwutlenku węgla wydaje się być najbardziej obiecująca. Potwierdza to raport IEA z 2004 roku, który prognozuje, że wprowadzenie ekwiwalentu 50 \$ kary za każdą wyemitowaną tonę CO₂ wraz z opracowaniem i zastosowaniem technologii wychwytywania i składowania tego gazu, w konsekwencji doprowadziłoby do stabilizacji i redukcji emisji o około 50 % w 2050 roku [1].

Obecnie rozważa się następujące miejsca składowania dwutlenku węgla:

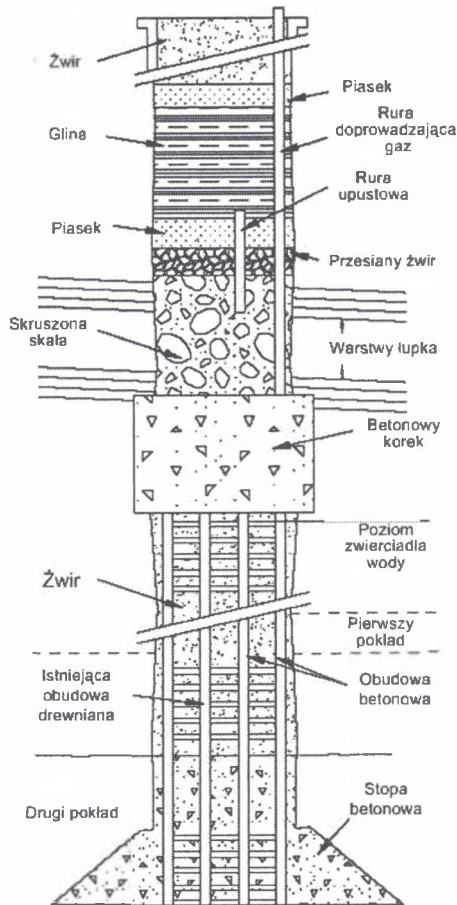
- dna mórz i oceanów lub rozpuszczanie CO₂ na głębokościach do 300 m,
- wyeksploatowane złoża ropy lub gazu,
- głębokie poziomy wodonośne,
- pozabilansowe pokłady węgla,
- kawerny solne,
- zlikwidowane kopalnie.

Obecnie stosuje się zatłaczanie CO₂ do złóż ropy naftowej w celu intensyfikacji wydobywania tego surowca (EOR, czyli Enhanced Oil Recovery), a także prowadzone są próby zatłaczania CO₂ do pokładów węgla w celu intensyfikacji wydobywania metanu (ECBM, czyli Enhanced Coal Bed Methane). Ponadto na złożu Sleipner w północnej części Norwegii prowadzi się zatłaczanie CO₂, odseparowanego z gazu ziemnego, na głębokość 1000 m do warstwy solanki formacji Utsira [8].

2. Przykłady podziemnych kopalń węgla jako magazynów gazu

Koncepcja składowania lub magazynowania gazu w nieczynnych kopalniach została zrealizowana na początku lat 60. w Stanach Zjednoczonych. W 1961 roku niedaleko Denver zamieniono nieczynną już kopalnię węgla kamiennego na magazyn gazu ziemnego pokrywający zapotrzebowanie na gaz w szczycie sezonu. Kopalnia eksploatowała dwa pokłady na głębokości 210 m i 225 m udostępnione czterema szybami. Nadkład składa się głównie z łupka i piaskowca oraz 20 m warstwy nieprzepuszczalnego iłowca. W celu przystosowania kopalni do magazynowania gazu, wyposażenie szybów zostało usunięte

i wypełniono je wg schematu na rys. 1. Ciśnienie, pod jakim jest składowany gaz, osiąga 1,8 MPa, co odpowiada 75 % ciśnienia hydrostatycznego i jest maksymalnym, jakie mogą utrzymać uszczelnione szyby. Całkowita pojemność magazynowa kopalni to około 74 mln m^3 , natomiast pojemność robocza 43 mln m^3 . Aby zapobiegać podnoszeniu się zwierciadła wody, woda jest stale pompowana na powierzchnię w ilości około 50 000 m^3 /rok [3].



Rys. 1. Schemat wypełnienia szybu w kopalni Leyden, USA [3]
 Fig. 1. Shaft filling scheme in Leyden mine, USA [3]

Kolejnym przykładem może być kopalnia Anderlus zlokalizowana na północy Belgii. Eksploatacja w tej kopalni zakończyła się w 1969 roku i od 1980 do 2000 roku kopalnia funkcjonowała jako podziemny magazyn gazu ziemnego. Nadkład stanowią warstwy gliny, margli i kredy. Poziomy eksploatacyjne kopalni zlokalizowane były na głębokości 660 m

i 1100 m, jednakże istnieją połączenia z płytkimi zalanyymi chodnikami, gdzie nadkład sięga tylko 10 m. Z tego też powodu ciśnienie magazynowe gazu wynosi 0,35 MPa. Przy tak niskim ciśnieniu adsorpcja gazu w pozostałych zrobach węglowych jest bardzo istotna jako dodatkowa przestrzeń magazynowa. Szacuje się, że około 160 mln m³ gazu jest zasorbowane na węglu, natomiast 20 mln m³ znajduje się w pustkach poeksploatacyjnych.

W Polsce planowano wykorzystać jako niskociśnieniowy podziemny magazyn gazu ziemnego wyrobiska kopalni Nowa Ruda. W modelu założono, że gaz będzie magazynowany w wyrobiskach typu kawernowego ($V = 989\,650\text{ m}^3$), w wyrobiskach i zrobach poeksploatacyjnych oraz skałach porowatych ($V = 6\,660\,000\text{ m}^3 - 11\,500\,000\text{ m}^3$), a także sorbowany na pozostałych resztkach pokładów węglowych ($V = 13\,000\,000\text{ m}^3$) przy ciśnieniu 1,0 MPa. Obliczono, że sumarycznie magazyn będzie mógł pomieścić od 76 mln m³ do 125 mln m³ gazu w części kawern, wyrobisk i zrobów poeksploatacyjnych, natomiast w masie węglowej może być zdeponowane ponad 119 mln m³ gazu. Szczelność magazynu miałyby gwarantować tzw. „korek wodny” (ekran kapilarny) spiętrzający wodę na wysokości 170 m ponad planowany strop magazynu. Ponadto, połączenia z powierzchnią miały być odpowiednio uszczelnione wyselekcjonowanym materiałem zasypowym w postaci środków mineralno-cementowych (np. geosetu) z odpadami z hałdy i kruszywem skalnym, popiołami lotnymi z geostem, materiałem mineralno-cementowym teksil oraz mieszaniną attapulgitu z solanką.

Dotychczas nie zapadła ostateczna decyzja o uruchomieniu prac mających na celu zamianę kopalni Nowa Ruda na magazyn gazu aczkolwiek wykonano część prac z tym związanych jak np. uszczelnienie szybu Leszek oraz upadowej wentylacyjnej z tego szybu [2].

3. Uwarunkowania geologiczno-górnice dla wysokociśnieniowego składowania CO₂ w podziemnych kopalniach węgla kamiennego

Sekwestracja dwutlenku węgla w podziemnych kopalniach węgla kamiennego może być zrealizowana przy założeniu następujących warunków:

- **szczelności składowiska gazu w długiej perspektywie czasowej** – zakłada się, że ewentualne ucieczki gazu nie mogą przekroczyć 0,1 % w ciągu roku dla czasu składowania 1000 lat),
- **dużej pojemności składowiska gazu** – tylko wtedy realizacja projektu może przyczynić się do znaczącej redukcji emisji CO₂,

- **niskich kosztów składowania gazu** – koszt wychwycenia i składowania nie może przewyższyć kar za emisje i być mniejszy niż cena tony CO₂ na rynku (cena na dzień 1.09.05–23.45 €/tCO₂, źródło: PointCarbon),
- **bezpieczeństwa składowania** – składowisko musi być absolutnie odizolowane od biosfery, zabezpieczone i monitorowane, tak aby uniknąć ryzyka nagłej ucieczki gazu.

Wszystkie powyższe warunki muszą być zrealizowane, aby można było rozważyć realizację projektu składowania CO₂ w podziemnej kopalni.

Jednakże, w przypadku zamkniętych kopalń należy się spodziewać następujących trudności związanych z:

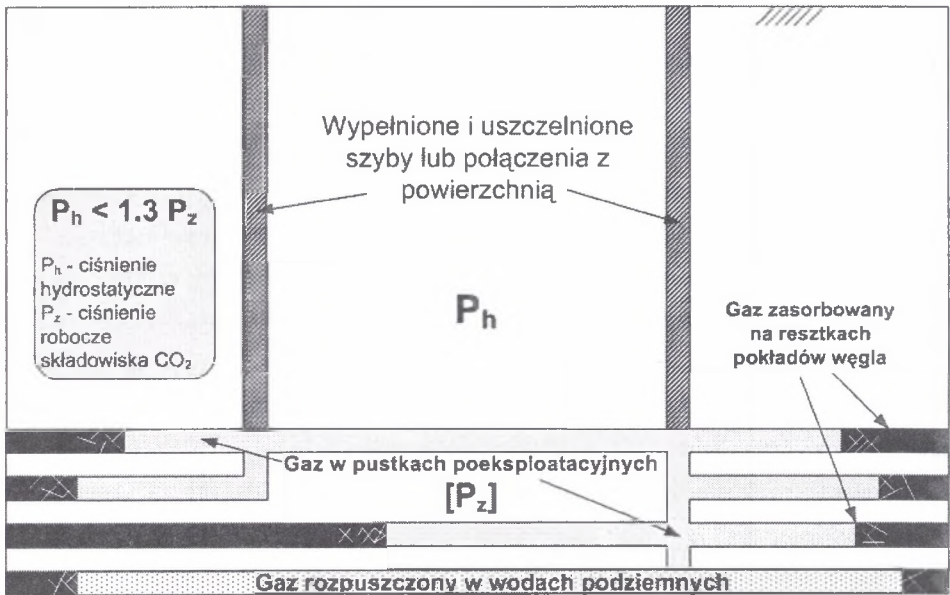
- **dopływem wód do wyrobisk**, które w konsekwencji powoduje podnoszenie zwierciadła wody i „wypychanie” gazu do góry poprzez szczeliny w górotworze, a także nieszczelności w izolacji z powierzchnią,
- **ewentualnymi spękaniami, szczelinami lub uskokami w warstwach nadległych,**
- **nieszczelnościami w izolacji wyrobisk udostępniających** (sztolnie, szyby, dowiezownie, itp.), którymi gaz może migrować do atmosfery.

Analiza ewentualnego miejsca składowania gazu w podziemnej kopalni węgla kamiennego powinna obejmować zagadnienia, takie jak [7]:

- szczelność nadkładu karbońskiej serii złożowej, jak również samego kompleksu karbońskiego,
- tektonika podłoża oraz serii złożowej,
- filary ochronne pozostawione w obrębie złoża,
- zasięg i stanu wyrobisk poeksploatacyjnych, a w szczególności zrobów znajdujących się powyżej przestrzeni składowania,
- stabilność w czasie wyrobisk udostępniających,
- występowanie ponad przestrzenią składowania warstw praktycznie nieprzepuszczalnych lub tzw. „korka wodnego”.

W przypadku składowania dwutlenku węgla w podziemnych kopalniach musimy mieć również na uwadze, że woda dopływająca do wyrobisk będzie ograniczać przestrzeń magazynową i w długiej perspektywie czasowej znacznie ograniczać pojemność składowiska. Zakładając, że dwutlenek węgla ma być składowany setki lub tysiące lat i możliwie najtaniej – stałe pompowanie wody z wyrobisk dołowych jest niedopuszczalne.

Koncepcję wysokociśnieniowego składowania CO₂ w zamkniętych kopalniach węgla kamiennego przedstawił Piessens i Dusar [2] zakładając, że gaz będzie składowany przy ciśnieniu równym lub wyższym niż ciśnienie hydrostatyczne (rys. 2). Pozwoli to na zahamowanie dopływu wód do wyrobisk dołowych i wykorzystanie pełnej pojemności składowiska. Z tego też powodu, odpowiednie wypełnienie połączeń z powierzchnią jest kwestią najistotniejszą i powinno zapewnić bezpieczeństwo składowania przy założeniu, że ciśnienie składowanego gazu będzie wynosić około 130 % ciśnienia hydrostatycznego.



Rys. 2. Koncepcja i miejsca składowania CO₂ w podziemnych kopalniach węgla kamiennego
Fig. 2. Concept of CO₂ storage and storage modes for CO₂ in abandoned coal mines

Chociaż dwutlenek węgla nie jest gazem toksycznym, istnieją poważne zagrożenia związane z tak wysokim ciśnieniem składowania, przede wszystkim:

- zmrozenie lub nagłe wychłodzenie elementów rurociągu lub instalacji spowodowane wahaniami (obniżeniem) ciśnienia przy ewentualnym wycieku,
- ryzyko ucieczki dużej ilości gazu, a więc powstanie zagrożenia dla życia.

4. Miejsca składowania i szacowanie pojemności magazynowej kopalni węgla kamiennego jako składowiska CO₂

Dwutlenek węgla w kopalni zamienionej na podziemny magazyn gazu może być składowany (magazynowany) w następujących miejscach:

- **pustkach poeksploatacyjnych** lub porowatych przestrzeniach górotworu jako tzw. „gaz wolny”,
- w pozostałych **zrobach węglowych i pokładach węgla** jako gaz zasorbowany,
- **rozpuszczony w wodach podziemnych** (solankach).

Gaz wypełniający wyrobiska korytarzowe, kawerny, pustki poeksploatacyjne i wolne przestrzenie porowate stanowi niewielką część całkowitej pojemności kopalni jako magazynu gazu. Objętość gazu, jaka może być magazynowana w tych przestrzeniach można obliczyć znając kubaturę podziemnych wyrobisk pomniejszoną o osiadanie warstw nadległych oraz kubaturę i porowatość gruzowiska zawałowego. Zakładając, że gaz będzie magazynowany na głębokościach powyżej 800 m należy mieć na uwadze, że ciśnienie będzie miało wartość około 8 MPa, co oznacza, że CO₂ będzie w fazie nadkrytycznej (ciśnienie krytyczne CO₂ = 7,382 MPa). Gęstość gazu jest uzależniona od temperatury i ciśnienia, jakie panuje w magazynie i może być obliczona z odpowiednich równań stanu gazu rzeczywistego. Dla fazy nadkrytycznej można zastosować równanie stanu wyrażone w funkcji energii swobodnej, które przyjmuje ogólną postać [6]:

$$A(\rho, T)/(R, T) = \varphi(\delta, \tau) = \varphi^o(\delta, \tau) + \varphi^f(\delta, \tau) \quad (1)$$

gdzie:

A – energia swobodna (energia Helmholtza); ρ – gęstość, kg/m³; T – temperatura, K; R – stała gazowa CO₂ (0,188 924 kJ/kg K); φ – bezwymiarowa jednostka energii swobodnej ($\varphi = A/RT$); φ^o – energia swobodna dla gazu idealnego; φ^f – szczątkowa energia swobodna (gaz rzeczywisty); τ – odwrotność temperatury zredukowanej ($\tau = T_c/T$), K; δ – gęstość zredukowana ($\delta = \rho - \rho_c$), kg/m³; T_c – temperatura krytyczna (304,1282 K); ρ_c – gęstość krytyczna (467,6 kg/m³).

Według powyższego wzoru gęstość dwutlenku węgla przy ciśnieniu 8 MPa, w temperaturze 42 °C (orientacyjna temperatura górotworu na głębokości 800 m) wynosi 260,13 kg/m³.

Największa część gazu, jaki może być składowany w kopalni jest zasorbowana na węglu. Pojemność resztek zrobów węglowych i pokładów można określić, znając ilość pozostałego węgla, a także własności sorpcyjne węgla. Na podstawie badań laboratoryjnych jest możliwe

określenie własności sorpcyjnych węgla według wyznaczonych izoterm sorpcji gazu na węglu. Wartości podaje się na ogół w m^3/t suchej masy węgla w przeliczeniu na warunki standardowe ($P = 0,1 \text{ MPa}$, $T = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Związek pomiędzy ilością zaadsorbowanego gazu a ciśnieniem opisuje np. izoterma sorpcji Langmuira, która przyjmuje postać:

$$V = V_L \frac{P}{P + P_L} \quad (2)$$

gdzie:

p – ciśnienie desorpcji, kPa

V – gazopojemność, m^3/t

V_L – stała objętości Langmuira, maksymalna objętość gazu możliwa do zasorbowania w 1 tonie węgla, m^3/t

P_L – stała ciśnienia Langmuira, ciśnienie, przy którym połowa możliwego do zasorbowania gazu jest zasorbowana, kPa

Oszacowanie ilości pozostawionego węgla wymaga dokładnego rozpoznania geologicznego zarówno pod względem geometrycznym, jak i jakościowym. Znając dokładną budowę pokładu można przeprowadzić symulacje rozprzestrzeniania się dwutlenku węgla w pokładzie węglowym stosując kompozycyjne symulatory komputerowe, jak np. SIMED II firmy CSIRO (Australia), GEM firmy Computer Modelling Group (USA) lub COMET 3 firmy Advanced Resources International.

Dwutlenek węgla może również być magazynowany jako gaz rozpuszczony w wodzie. Dotyczy to głównie zatopionej części kopalni i nie wpływa znacząco na pojemność składowiska. Rozpuszczalność CO_2 w wodzie zależy głównie od temperatury, ciśnienia a także od zasolenia wody. Im bardziej woda jest zasolona, tym mniej rozpuszczalny jest CO_2 . Przy zasoleniu równym 50 g/l NaCl rozpuszczalność CO_2 spada o około 25 %. Szacuje się, że rozpuszczony dwutlenek węgla w danej objętości to zaledwie 10 % ilości, jaka może znaleźć się w podobnych warunkach w pustej przestrzeni.

Według ostrożnych szacunków przedstawionych w projekcie Unii Europejskiej GESTCO [4] prowadzonych na terenie Belgii, do przeciętnej kopalni w zagłębiu Campine można załoczyć rocznie (przy założeniu wysokociśnieniowej koncepcji składowania) od 300 000 t do 500 000 t CO_2 przez okres około 25 lat.

5. Podsumowanie

Zagadnienie wysokociśnieniowego składowania CO₂ w podziemnych kopalniach węgla kamiennego wymaga jeszcze wielu badań, aby zaproponowana koncepcja mogła zostać zrealizowana. W szczególności należy zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- szczelne zaizolowanie połączeń z powierzchnią wyrobisk podziemnych i zrobów, takich jak szyby, dowieznie, sztolnie, itd., które będą w stanie wytrzymać ciśnienia sięgające 10 MPa,
- trwałość materiałów wypełniających w agresywnym środowisku (solanka + CO₂),
- monitoring ewentualnych nieszczelności, które mogą powodować ucieczki gazu,
- dokładne rozpoznanie geologiczne i tektoniczne w celu szczegółowego opisu miejsca składowania,
- stworzenie modelu numerycznego, który pozwoli na oszacowanie pojemności składowiska, a także symulację procesu zatłaczania CO₂,

LITERATURA

1. Assessing the Potential of Carbon Capture & Storage. Ecoal vol. 53, World Coal Institute, London 2005.
2. Cisek W., Dybciak A., Landsberg W.: Przebieg i doświadczenia z likwidacji kopalni „Nowa Ruda” w aspekcie przekształcenia wyrobisk dołowych na potrzeby podziemnego magazynu gazu. Przegląd Górniczy Nr 7-8, 2001.
3. Gas Storage at the Abandoned Leyden Coal Mine near Denver, Colorado. U.S EPA Report. November 1998.
4. Geological storage of CO₂ from combustion of fossil fuel. European Union Fifth Framework Programme for Research & Development. Project nr ENK6-CT-1999-00010. Summary Report.
5. Piessens K., Duser M.: Feasibility of CO₂ Sequestration in abandoned coal mines. Geologica Belgica Volume 7 (3-4). Brussels 2004.
6. Span R., Wagner W.: A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple point temperature to 1100 K at pressures up to 8000 MPa. Journal of physical and chemical reference data. V.25, p. 1509-1596. Gaithersburg, 1996.
7. Twardowski K.: Wykorzystanie likwidowanych kopalń do tworzenia podziemnych magazynów gazu i wód termalnych. Materiały Konferencji Szkoła Eksploatacji Podziemnej (s.549-566), Kraków 2000.
8. www.statoil.com.