

BARBARA ULIASZ-MISIAK*

Klasyfikacje pojemności i kryteria wyboru miejsc składowania CO₂

Wprowadzenie

Pojemność składowania CO₂ jest to ilość gazu jaką można umieścić w rozpatrywanej strukturze geologicznej. Jest ona determinowana przez: wielkość struktury, miąższość utworów do składowania, ich porowatość, właściwości PVT, gęstość CO₂ oraz rodzaj płynów złożowych wypełniających strukturę.

W zależności od wielkości rozpatrywanego obszaru pojemność składowania dwutlenku węgla można obliczać dla pojedynczej struktury geologicznej tzn. miejsca składowania, basenu, regionu, kraju aż do skali globu. Najdokładniejsze oszacowania pojemności składowania CO₂ możemy uzyskać w skali miejsca składowania, dla którego sporządza się model geologiczny i symulację zatłaczania. W zależności od przyjętej skali oceny, występować będą również ograniczenia w stosowaniu określonych metod obliczeniowych. W przypadku obliczeń w skali basenu, regionu lub kraju, często brak jest szczegółowych danych, dlatego mają one charakter szacunkowy. W otrzymanych szacunkach należy uwzględnić również ograniczenia składowania wynikające z aspektów ekonomicznych, technicznych i prawnych.

Stosowanie różnych metod obliczeniowych przy wykorzystaniu danych o różnej jakości i wiarygodności skutkuje różną dokładnością ocen pojemności. Dlatego do porównywania oszacowań konieczne jest wprowadzenie klasyfikacji pojemności. Istniejące obecnie klasyfikacje pojemności składowania dwutlenku węgla są modyfikacjami klasyfikacji zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego. Przedstawiono w artykule klasyfikacje stosowane na świecie oraz propozycję klasyfikacji polskiej.

* Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Wybór miejsc odpowiednich do składowania dwutlenku węgla polega na ocenie formacji geologicznych pod kątem ich przydatności do tych celów przy wykorzystaniu określonych kryteriów.

1. Stosowane klasyfikacje pojemności składowania

W analizowanych pracach, pojemność składowania dwutlenku węgla traktowana jest w sposób analogiczny do zasobów węglowodorów (CSLF 2005, 2007, 2008; CO2CRC 2008). Dlatego do klasyfikowania pojemności składowania CO₂ wykorzystano podziały stosowane do zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego (CSLF 2007; DOE 2006; Uliasz-Misiak 2008).

Rozpatrując pojemności składowania CO₂ poprzez klasyfikację można wskazać lokalizacje, gdzie składowanie będzie ekonomiczne i technicznie wykonalne. W przyszłości może się jednak okazać, że miejsca obecnie nie kwalifikujące się do składowania, ze względu na postęp technologiczny mogą okazać się przydatne do tego celu.

Klasyfikacja zasobów złóż ropy naftowej i gazu ziemnego SPE/WPC/AAPG

W klasyfikacji zasobów złóż ropy naftowej i gazu ziemnego *Petroleum Resources Management System (PRMS)* opracowanej przez *Society Petroleum Engineering (SPE)*, *World Petroleum Congress (WPC)* i *Association American Petroleum Geology (AAPG)* wyróżniono zasoby geologiczne (*resources*), które dzieli się na: odzyskiwalne (*reserves*), warunkowe (*contingent resources*) oraz nieodzyskiwalne (Nieć 2008). Zasoby odzyskiwalne i warunkowe w zależności od prawdopodobieństwa, z jakim je oszacowano dzieli się na (Nieć 2006; Demirmen 2007):

- stwierdzone (*proved*), stanowiące tę ilość zasobów, których wydobycie ze złoża w ilości oszacowanej lub większej może być gwarantowane z prawdopodobieństwem 90%,
- stwierdzone i prawdopodobne (*proved and probable*), stanowiące tę ilość zasobów, których wydobycie ze złoża w ilości oszacowanej lub większej może być gwarantowane z prawdopodobieństwem 50%,
- stwierdzone, prawdopodobne i możliwe (*proved, probable and possible*), stanowiące tę ilość zasobów, których wydobycie ze złoża w ilości oszacowanej lub większej może być gwarantowane z prawdopodobieństwem 10%.

Klasyfikacja Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF)

Klasyfikację pojemności składowania opracowaną przez *Carbon Sequestration Leadership Forum* (2005, 2007, 2008) oparto na koncepcji piramidy zasobów przedstawionej przez McCabe (1998) do oceny zasobów węglowodorów w skali świata. Przy ocenie pojemności składowania CO₂ rozpatruje się uwarunkowania geologiczne, hydrogeologiczne, techniczne, ekonomiczne. CSFL przedstawił trzy sposoby oceny pojemności składowania CO₂ na podstawie różnych kryteriów. Ich klasyfikację przedstawiono w postaci piramidy:

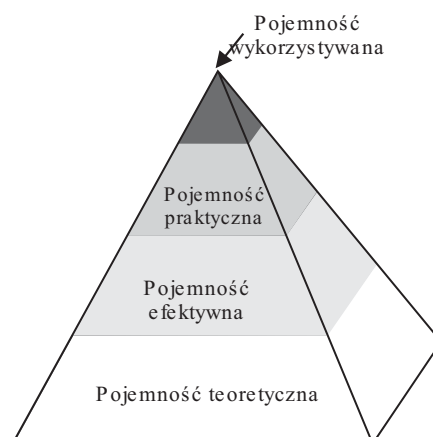
1) na podstawie zdolności do przyjęcia CO₂ w stosunku do jego źródła (*high level capacity pyramid*),

2) na podstawie dodatkowo uwzględnionych kryteriów techniczno-ekonomicznych warunkowań składowania (*technico-economic pyramid*),

3) na podstawie rodzaju pułapki, mechanizmu składowania i jego efektywności w czasie (*trap type and effectiveness pyramid*).

Podział na podstawie kryteriów techniczno-ekonomicznych proponowany jest jako podstawowy. Uwzględnia on zasadnicze czynniki decydujące o możliwości i wielkości składowania. Umożliwia dokonywanie ocen w różnych skalach od kraju do miejsca składowania. Pozostałe podziały są mniej przydatne albo z powodu zbyt ogólności (*high level*) lub szczegółowości (*trap type*) ostatni z wymienionych ma zastosowanie ograniczone, jedynie do oszacowań w skali miejsca składowania ze względu na konieczność posiadania szczegółowych danych na jego temat.

Pojemność składowania CO₂ jest wyrażona w jednostkach masy. Podział na podstawie kryteriów techniczno-ekonomicznych uwzględnia różnego rodzaju informacje o pojemności. Ich wielkość i pozycja zmieniają się w czasie wraz z dostępnymi danymi, wiedzą, technologią, polityką, uregulowaniami prawnymi i ekonomiką geologicznego składowania CO₂. Wyróżnia się cztery kategorie techniczno-ekonomiczne (rys. 1) pojemności składo-



Rys. 1. Techniczno-ekonomiczna piramida pojemności składowania CO₂ w strukturach geologicznych (CSFL 2007)

Fig. 1. Techno-economic pyramid for CO₂ storage capacity in geological structure (CSFL 2007)

wania w zależności od niepewności odnośnie danych geologicznych i ekonomicznych uwzględnionych przy jej szacowaniu:

- **teoretyczna pojemność składowania** (*Theoretical Capacity*) jest to maksymalna całkowita ilość CO₂, jaką jednostka geologiczna może pomieścić. Zakłada się, że jest dostępna do składowania cała objętość porowa struktury lub/i CO₂ osiągnie w wyniku rozpuszczania w płynach złożowych 100% nasycenie;

- **efektywna pojemność składowania** (*Effective Capacity*) stanowiąca część pojemności teoretycznej. Jest to pojemność, jaka może być dostępna do składowania przy uwzględnieniu dodatkowych kryteriów wynikających z przyjętej technologii składowania. Jest to oszacowanie dające istotne wskazówki, co do technicznej wykonalności składowania CO₂ w rozpatrywanej jednostce geologicznej;
- **praktyczna pojemność składowania** (*Practical Capacity*) jest to część pojemności efektywnej, którą określa się przy uwzględnieniu technicznych, ekonomicznych i prawnych barier dla składowania dwutlenku węgla. Dla jej oszacowania uwzględnia się porównanie źródła emisji CO₂ i miejsca składowania;
- **dopasowana (wykorzystywana) pojemność składowania** (*Matched Storage Capacity*) jest to część pojemności praktycznej otrzymywana przez szczegółowe porównanie wielkości emisji z dużych punktowych źródeł z pojemnością miejsca geologicznego składowania, przy uwzględnieniu pojemności, chłonności i prędkości zatłaczania.

Zarówno efektywna jak i praktyczna pojemność składowania CO₂ mogą ulegać zmianom; pierwsza wraz z uzyskaniem nowych danych geologicznych, druga przy zmianach warunkowań politycznych, prawnych, ekonomicznych lub poprzez wykorzystanie nowych technologii.

Klasyfikacja Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies – CO2CRC

Klasyfikacja pojemności składowania CO₂ zaproponowana przez *Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies* (CO2CRC) z Australii bazuje na klasyfikacji pojemności opracowanej przez CSLF (2007, 2008) zmodyfikowanej na podstawie klasyfikacji zasobów węglowodorów SPE. Uwzględnia ona przestrzeń porową struktury oraz niepewność jej oszacowania (rys. 2).

Całkowita objętość porowa (*Total Pore Volume*) jest to całkowita objętość porów szacowana w rozpatrywanych basenach sedymentacyjnych lub potencjalnych miejscach składowania oraz objętość jeszcze nie zidentyfikowana. Całkowita objętość porowa dzieli się na nieodkrytą objętość porową (*Undiscovered Pore Volume*) i odkrytą objętość porową (*Discovered Pore Volume*).

- **Teoretyczna i nieudokumentowana objętość porowa** (*Undiscovered Pore Volume*) jest to przestrzeń porowa, która nie jest obecnie dostępna, ale w przyszłości może być udostępniona do składowania np. poprzez wdrożenie nowych technologii. Oszacowana teoretyczna i nieudokumentowana objętość porowa określona jest jako **perspektywiczna pojemność składowania** (*Prospective Storage Capacity*). Jest to wielkość przestrzeni porowej w nieodkrytych miejscach składowania, w których ocenia się, że będzie możliwe technicznie i ekonomicznie zatłaczanie dwutlenku węgla.
- **Stwierdzona objętość porowa** jest to objętość porowa struktury geologicznej, którą można obliczyć na podstawie istniejących danych, dzieli się ją na komercyjną i subkomercyjną. Określane są one jako operacyjna pojemność składowania (*Operational*

Całkowita objętość porów <i>Total Pore Volume</i>	STWIERDZONA objętość porów <i>discovered Pore Volume</i>	komercyjna pojemność składowania <i>Commercial Storage Capacity</i>	Operacyjna pojemność składowania <i>Operational Storage Capacity</i>		
			Stwierdzona <i>proved</i>	stwierdzona i prawdopodobna <i>proved and probable</i>	stwierdzona, prawdopodobna i możliwa <i>proved, probable and possible</i>
	SUBKOMERCYJNA pojemność składowania <i>SUB-Commercial Storage Capacity</i>	Warunkowa pojemność składowania <i>Contingent Storage Capacity</i>			
		niskie oszacowanie <i>low estimate</i>	optymalne oszacowanie <i>best estimate</i>	wysokie oszacowanie <i>high estimate</i>	
	TEORETYCZNA NIEUDOKUMENTOWANA objętość porów <i>not covered Pore Volume</i>	Może być wykorzystana komercyjnie <i>Commercially recoverable</i>	Perspektywiczna pojemność składowania <i>Prospective Storage Capacity</i>		
	niskie oszacowanie <i>low estimate</i>		optymalne oszacowanie <i>best estimate</i>	wysokie oszacowanie <i>high estimate</i>	

← Zakres niepewności →



Rys. 2. Klasyfikacja pojemności składowania CO₂ opracowana przez CO2CRC (CO2CRC 2008)

Fig. 2. Carbon dioxide classification elaborated by CO2CRC (CO2CRC 2008)

Storage Capacity) i warunkowa pojemność składowania (*Contingent Storage Capacity*):

- **Operacyjna pojemność składowania** (*Operational Storage Capacity*) to objętość przestrzeni porowej, jaka może być technicznie i ekonomicznie dostępna dla zatłaczania CO₂ w rozpatrywanych miejscach składowania; obliczana na podstawie aktualnie dostępnych danych. Wyróżnia się: stwierdzoną, stwierdzoną i praw-

dopodobną oraz stwierdzoną, prawdopodobną i możliwą na podstawie prawdopodobieństwa ich oszacowania.

- **Warunkowa pojemność składowania** (*Contingent Storage Capacity*) jest to wielkość przestrzeni porowej oszacowana na podstawie aktualnie dostępnych danych, jako potencjalnie technicznie i ekonomicznie możliwa do wykorzystania do zatłoczenia CO₂ w rozpatrywanych miejscach składowania w oparciu o przewidywane przyszłe uwarunkowania techniczno-ekonomiczne. Obecnie nie jest rozważana.

Warunkową i perspektywiczną pojemność składowania CO₂ określa się z różną niepewnością (*Uncertainty*) jako: minimalne, średnie i maksymalne oszacowanie. Zakres niepewności odzwierciedla zakres oszacowanej potencjalnej objętości porowej, do której można zatłoczyć dwutlenek węgla w danym miejscu składowania. Zakres niepewności zależy od ilości i jakości wykorzystanych danych, dlatego oceny powinny być wykonywane metodami probabilistycznymi. Dla warunkowej i perspektywicznej pojemności składowania wyróżnia się wysokie, optymalne i niskie oszacowanie (*high, best and low estimation*) odpowiednio z prawdopodobieństwem 10, 50 i 90%. Pojemność składowania CO₂ w kategorii operacyjnej szacuje się tak samo jak zasoby węglowodorów jako pojemność operacyjną stwierdzoną, stwierdzoną i prawdopodobną oraz stwierdzoną, prawdopodobną i możliwą także odpowiednio z prawdopodobieństwem 10%, 50% i 90%.

Klasyfikacje CSLF i CO2CRC przyjmują różne zasady wyróżniania poszczególnych kategorii zasobów. W klasyfikacji CSLF jest to system hierarchiczny. Wyróżnia on pojemność teoretyczną całkowitą, a w niej efektywną, obejmującą praktyczną, zawierającą pojemność „dopasowaną”. W klasyfikacji CO2CRCR podział zasobów jest komplementarny. Całkowita pojemność obejmuje teoretyczną i warunkową oraz operacyjną określone niezależnie.

Proponowana klasyfikacja pojemności składowania CO₂

Proponowana klasyfikacja pojemności składowania dwutlenku węgla łączy koncepcję podziału pojemności składowania autorstwa Bachu i innych (CSLF 2005, 2007, 2008) oraz klasyfikację zasobów węglowodorów SPE/WPC/AAPG (Nieć 2006; Demirmen 2007; Reserves and... 2007; Uliasz-Misiak 2008). Zawiera ona następujące kategorie pojemności składowania dwutlenku węgla:

Teoretyczna pojemność składowania CO₂ jest to ilość dwutlenku węgla jaka może być składowana w całej przestrzeni porowej danej struktury. Można ją podzielić na: efektywną pojemność składowania, warunkową pojemność składowania oraz nie- dostępną pojemność składowania dwutlenku węgla (rys. 3).

- **Efektywna pojemność składowania** jest to ilość dwutlenku węgla jaka może być składowana w rozpoznanych strukturach geologicznych przy uwzględnieniu kryteriów geologicznych, technicznych i środowiskowych. Utwory do składowania muszą być położone na odpowiedniej głębokości, mieć wystarczająco dużą miąższość, przepuszczalność i porowatość, ich nadkład powinien charakteryzować się małą przepuszczalnością, odpowiednią miąższością i brakiem uskoków. Pojemność szacowana jest na podstawie aktualnie posiadanych danych jako część przestrzeni

TEORETYCZNA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂				
EFEKTYWNA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂			WARUNKOWA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂	NIEDOSTĘPNA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂
EFEKTYWNA STWIERDZONA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂	EFEKTYWNA PRAWDOPODOBNA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂	EFEKTYWNA MOŻLIWA POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA CO ₂		

Rys. 3. Proponowana klasyfikacja pojemności składowania dwutlenku węgla (Uliasz-Misiak 2008)

Fig. 3. Proposed classification of carbon dioxide storage capacity (Uliasz-Misiak 2008)

porowej danej struktury. Przy ocenie brana jest pod uwagę odległość od emitenta dwutlenku węgla oraz możliwości jego transportu. Tę kategorię pojemności można podzielić na: efektywną stwierdzoną pojemność składowania, efektywną prawdopodobną pojemność składowania oraz efektywną możliwą pojemność składowania. **Efektywna stwierdzona pojemność składowania** jest to taka ilość CO₂, której zatłoczenie w ilości obliczonej może być gwarantowane z prawdopodobieństwem 90%, **efektywna prawdopodobna pojemność składowania** jest gwarantowana z prawdopodobieństwem 50% i **efektywna możliwa pojemność składowania CO₂** z prawdopodobieństwem 10%.

- **Warunkowa pojemność składowania** odpowiada ilości CO₂, jaka będzie możliwa do składowania w rozpoznanych strukturach geologicznych, które spełniają takie same kryteria geologiczne jak w przypadku pojemności efektywnej. Chociaż obecnie nie są możliwe do wykorzystania ze względów technicznych lub środowiskowych (np. braku emitenta w pobliżu), w przyszłości mogą być rozważane jako miejsca składowania w wyniku postępu technicznego, zmian gospodarczych itp. Może ona być podzielona na: stwierdzoną, prawdopodobną i możliwą.
- **Niedostępna pojemność składowania** jest to część przestrzeni porowej, która nie spełnia obecnie kryteriów przydatności do składowania, takich jak np. głębokość zalegania czy brak uszczelnienia i ze względu na to nie kwalifikuje się do składowania dwutlenku węgla. Przewiduje się, że w przyszłości po zmianie warunków technicznych lub ekonomicznych może być wykorzystana do składowania. Odpowiada zasobom pozabilansowym.

Teoretyczną, efektywną i warunkową pojemność składowania można obliczać we wszystkich skalach oszacowań. Efektywna stwierdzona, prawdopodobna i możliwa pojemność

składowania ze względu na to, że wymagają do obliczeń szczegółowych danych mogą być oszacowane jedynie w skali miejsca składowania.

W odniesieniu do podziału zasobów stosowanego w Polsce, teoretyczna pojemność składowania odpowiada całkowitym zasobom geologicznym, natomiast efektywna i warunkowa pojemność składowania – zasobom wydobywalnym odpowiednio przemysłowym i bilansowym.

2. Kryteria wyboru składowisk dwutlenku węgla

Kryteria bilansowości to zestaw parametrów geologicznych, górniczych i ekonomicznych, jakie powinno spełniać nagromadzenie kopaliny, aby uznać je za złożo. Ogólnie można podzielić je na dwie grupy: forma i położenie złoża (miąższość, głębokość, stosunek grubości nadkładu do miąższości złoża) oraz cechy jakościowe kopaliny definiujące jej użyteczność. Dla wszystkich rozpatrywanych parametrów należy brać pod uwagę ich brzeżne wartości. Kryteria bilansowości określa się na podstawie: doświadczeń górniczych, uproszczonego rachunku ekonomicznego oraz technologii użytkowania kopaliny (Nieć 2002). W celu wyboru miejsc składowania dwutlenku węgla należy zastosować wymogi, które muszą być spełnione w sposób analogiczny do kryteriów bilansowości złóż. Pozwalają one stwierdzić czy struktura geologiczna jest odpowiednia do składowania dwutlenku węgla. Kryteria stosowane do wyboru składowisk CO₂ można zdefiniować jako zestaw parametrów geologicznych, złożowych i technicznych jakie spełniać musi struktura geologiczna, aby można uznać ją za składowisko tego gazu.

Obecnie nie ma ustalonych jednolitych kryteriów wyboru składowisk dwutlenku węgla, chociaż w ramach różnych projektów podejmowane były takie próby (CO₂CRC 2008; Best practise... 2006). W Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla w Załączniku I przedstawiono kryteria opisu i oceny składowisk (Dyrektywa... 2008). Opis i ocenę składowisk przeprowadza się w czterech etapach: zebranie danych (geologia, geofizyka, hydrogeologia, inżynieria zbiornika, geochemia, geomechanika, sytuacja sejsmiczna, obecność dróg ucieczki, otoczenie składowiska, konflikt interesów, odległość od emitenta); komputerowa symulacja kompleksu składowania CO₂; opis bezpieczeństwa, wrażliwości i zagrożeń; ocena ryzyka. Dyrektywa pozwala na odstępstwa od jednego lub więcej kryteriów pod warunkiem, że nie wpłynie to na możliwość wykonania opisu i oceny formacji geologicznej pod kątem wykorzystania jej jako składowiska dwutlenku węgla. Jednak wymienione w Dyrektywie kryteria nie służą do wyboru struktur na składowiska CO₂; przedstawiają jedynie sposób, w jaki należy opisać i ocenić wybrane miejsce składowania (Dyrektywa... 2008).

Wybór miejsca na składowisko dwutlenku węgla jest uzależniony od wielu aspektów geologicznych, złożowych, technicznych, środowiskowych i ekonomicznych. Podstawowe parametry decydujące o tym, czy dana struktura może być rozpatrywana jako przyszłe składowisko dwutlenku węgla to:

- głębokość występowania formacji do składowania,
- gruby, szczelny, niezuskokowany nadkład,
- chłonność formacji do składowania umożliwiająca zatłoczenie określonej ilości gazu w jednostce czasu,
- pojemność składowania CO₂,
- brak konfliktu interesów,
- odległość od emitenta.

Głębokość zalegania formacji warunkuje temperaturę i ciśnienie wpływające na fazę, w jakiej jest zatłoczony dwutlenek węgla. Pojemność składowania wynika z powierzchni i miąższości struktury. Chłonność formacji zależy od jej porowatości i przepuszczalności. Szczelny nadkład o dużej miąższości jest podstawowym warunkiem bezpieczeństwa składowania. W przypadku, gdy na obszarze struktury rozważanej jako miejsce składowania zlokalizowane są złoża surowców mineralnych lub istnieje kontakt formacji proponowanej do składowania z wodami pitnymi, występuje konflikt interesów z ewentualną eksploatacją złoża lub wód. Odległość od emitenta do składowiska gazu – rzutująca na ekonomikę całego przedsięwzięcia – powinna być jak najmniejsza. Podobnie jak kryteria bilansowości kryteria wyboru miejsc na składowiska dwutlenku węgla dobierane są na podstawie doświadczeń (magazyny gazu ziemnego, eksploatacja węglowodorów) oraz stosowanych technologii.

Proponowane podstawowe kryteria wyboru składowisk w poziomach wodonośnych dotyczą parametrów formacji do składowania, jej nadkładu i odległości od potencjalnego emitenta dwutlenku węgla (tab. 1). Jako minimalną głębokość zalegania formacji do składowanie przyjęto –800 m (Best practise... –1000 m); umożliwia ona występowanie dwu-

TABELA 1

Podstawowe kryteria wyboru składowisk CO₂

TABLE 1

Main criteria of CO₂ storage site selection

Kryteria	1	2
Głębokość zalegania	–1000 m – –2500 m p.p.t.	–800 – –3500 m p.p.t.
Miąższość efektywna	>50 m	>50 m
Właściwości petrofizyczne: – porowatość – przepuszczalność	>20% >300 mD	>15% >100 mD
Pojemność składowania	większa niż całkowita ilość CO ₂ wyprodukowana przez źródło emisji	umożliwiająca składowanie 30-letniej emisji rozpatrywanego źródła emisji (>60 Mt)
Miąższość nadkładu	>100 m	>100 m
Zaangażowanie tektoniczne	brak uskoków	brak uskoków
Odległość od emitenta	–	<100 km

1 – wartości na podstawie Best practise... (2006)

2 – wartości zaproponowane przez autorkę

tlenku węgla w fazie superkrytycznej, w warunkach normalnego gradientu geotermicznego i ciśnienia. Ograniczenie głębokości, na jakiej ma być prowadzone składowanie do –3500 m (Best practise... –2500 m) wynika z tego, że wraz ze wzrostem głębokości pogarszają się parametry skał zbiornikowych oraz wzrastają koszty zatłaczania. Formacja do składowania powinna charakteryzować się odpowiednio dużą miąższością (powyżej 50 m) i dobrymi parametrami zbiornikowymi, umożliwiającymi zatłaczanie dużych ilości dwutlenku węgla. Brzeżne wartości parametrów petrofizycznych przyjęto na podstawie danych literaturowych dla skał wodonośnych (Pazdro 1983) porowatość 15% (Best practise... – 20%), przepuszczalności powyżej 100 mD (Best practise... – 300 mD). Składowisko powinno mieć pojemność składowania umożliwiającą składowanie 30-letniej emisji dwutlenku węgla. Przyjęto, że najmniejszy zakład dla którego można rozważyć składowanie CO₂ emituje rocznie 2 Mt tego gazu, dlatego zaproponowana wartość brzeżna wynosi 60 Mt. W Best practise... (2006) przyjęto, że pojemność składowania musi być większa niż całkowita ilość gazu wyprodukowana przez danego emitenta w okresie 30 lat eksploatacji składowiska.

Nadkład skalny stanowiący uszczelnienie formacji do składowania powinien charakteryzować się dużą miąższością (powyżej 100 m) oraz niską porowatością i przepuszczalnością. Ważnym warunkiem jest również brak uskoków w nadkładzie, które mogą być potencjalnymi ścieżkami migracji CO₂ ze składowiska. Jako ostatnie kryterium zaproponowano odległość składowiska od miejsca emisji gazu (poniżej 100 km).

Podsumowanie

Na dzień dzisiejszy brak jest – tak w Polsce, jak i na świecie – jednolitej klasyfikacji pojemności składowania dwutlenku węgla. Klasyfikacje pojemności składowania CO₂ opracowane przez CSLF (2005, 2007) oraz CO₂CRC bazują na piramidzie zasobów i klasyfikacji zasobów węglowodorów SPE.

Ze względu na różny sposób szacowania pojemności składowania (od bardzo ogólnego za pomocą wzorów do szczegółowego symulacją komputerową), zatłaczania oraz różnych kryteriów przypisanie danej ocenie kategorii pojemności pozwoli na porównywanie oszacowań pomiędzy sobą bez znajomości sposobu jej obliczania.

Przedstawione kryteria (głębokość zalegania formacji, jej miąższość i parametry zbiornikowe, miąższość i parametry petrofizyczne nadkładu oraz odległość od emitenta) mają służyć do wstępnej selekcji struktur geologicznych jako miejsc składowania dwutlenku węgla. W dalszej kolejności w celu oceny formacji do składowania CO₂ należy przeprowadzić jej szczegółowe badania oparte na schemacie przedstawionym w Dyrektywie dotyczącej geologicznego składowania dwutlenku węgla.

Autorka wyraża podziękowanie prof. Markowi Nieciowi za cenne uwagi i dyskusje pomocne w ostatecznym zredagowaniu artykułu.

LITERATURA

- Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Burruss R., Holloway S., Christensen N.P., Maathiasen O.M., 2007 – CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control* v. 1, no. 4, s. 430–443.
- Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. Observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects. Red. Chadwick A., Arts R., Bernstone C., May F., Thibeau S., Zweigel P. 2006. http://www.ngu.no/FileArchive/91/CO2STORE_BPM_final_small.pdf, s. 289, (wrzesień 2008).
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), 2005 - A taskforce for review and development of standards with regards to storage capacity measurement; CSLF-T-2005-9 15, August 2005. <http://www.cslforum.org/documents>, s. 16 (grudzień 2007).
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), 2007: Estimation of CO₂ storage capacity in geological media, June 2007. <http://www.cslforum.org/documents>, s.43, (grudzień 2007).
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), 2008: Comparison between Methodologies Recommended for Estimation of CO₂ Storage Capacity in Geological Media by the CSLF Task Force on CO₂ Storage Capacity Estimation and the USDOE Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program; CSLF-T-2008-04, 21 April 2008. <http://www.cslforum.org/documents>, s. 21, (styczeń 2009).
- Demirren F., 2007 – Reserves Estimation: The Challenge for the Industry. *Journal of Petroleum Technology*, May 2007, s. 80–89.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywy Rady 85/337/EWG, 96/61/WE, dyrektywy 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ>. Wniosek Dyrektywy – wersja ostateczna Bruksela, dnia 23.01.2008, (marzec 2009).
- McCabe P.J., 1998 – Energy resources – Cornucopia or empty barrel? *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 82 (11), s. 2110–2134.
- Nieć M., 2002 – Czym są kryteria bilansowości i ich rola w gospodarce złożem. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 18, z. spec., s. 29–40.
- Nieć M., 2006 – Problemy klasyfikacji zasobów złóż kopalin. *Przegląd Górniczy* 4, s. 21–27.
- Nieć M., 2008 – Międzynarodowe klasyfikacje zasobów złóż kopalin. *Problemy unifikacji. Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 24, z. 2/4, s. 268–275.
- Pazdro Z., 1983 – *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, s. 575.
- Reserves and Resources Classification, definitions, and Guidelines: Defining the Standard, 2007. *Journal of Petroleum Technology*, December 2007, s. 63–67.
- CO₂CRC, 2008 – Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterisation for CO₂ Storage Projects. Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Canberra. CO₂CRC Report No. RPT08-1001, s. 52.
- Uliasz-Misiak B., 2008 – Pojemność podziemnego składowania CO₂ dla wybranych mezozoicznych poziomów wodonośnych oraz złóż węglowodorów w Polsce. *Studia Rozprawy Monografie* nr 142, Kraków, s. 114.

KLASYFIKACJE POJEMNOŚCI I KRYTERIA WYBORU MIEJSC SKŁADOWANIA CO₂

Słowa kluczowe

Pojemność składowania CO₂, klasyfikacja, kryteria wyboru miejsc składowania

Streszczenie

Geologiczne składowanie jest jedną z metod unieszkodliwiania antropogenicznej emisji dwutlenku węgla. Wdrożenie tej metody wymaga opracowania szeregu zagadnień, w tym klasyfikacji pojemności składowania oraz kryteriów wyboru składowisk dwutlenku węgla.

Stosowane obecnie klasyfikacje pojemności składowania dwutlenku węgla oparte są na podziale zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego oraz piramidzie zasobów węglowodorów. Klasyfikacja pojemności składowania opracowana przez *Carbon Sequestration Leadership Forum* stosuje piramidę techniczno-ekonomiczną pojemności składowania, w której wydzielone są cztery kategorie pojemności składowania: teoretyczna, efektywna, praktyczna i dopasowana. Podziały pojemności składowania przedstawione przez CO2CRC oraz zaproponowane w artykule bazują na piramidzie pojemności zmodyfikowanej według klasyfikacji zasobów węglowodorów SPE, przy uwzględnieniu niepewności oszacowania. W klasyfikacji CO2CRC całkowita objętość porowa dzieli się na: perspektywiczną, warunkową i operacyjną pojemność składowania. W podziale pojemności składowania zaproponowanym w niniejszym artykule w ramach teoretycznej pojemności składowania wyróżniono następujące kategorie: efektywna, warunkowa i niedostępna pojemność składowania.

Wyboru struktur przeznaczonych na składowiska dwutlenku węgla dokonuje się stosując kryteria, które można zdefiniować jako zestaw parametrów geologicznych, złożowych i technicznych jakie spełniać musi struktura geologiczna, aby można uznać ją za składowisko tego gazu. Przedstawione podstawowe wymogi, jakie musi spełniać składowisko dwutlenku węgla, to: odpowiednia głębokość zalegania i dobre parametry zbiornikowe formacji do składowania, duża pojemność składowania CO₂, szczelny, niezuskokowany nakład o małej przepuszczalności i niewielka odległość od emitenta. Kryteria te służą do wstępnego wyboru miejsca na składowisko. W dalszej kolejności, w celu oceny formacji do składowania CO₂ należy przeprowadzić jej szczegółowe badania według schematu przedstawionego w Dyrektywie dotyczącej geologicznego składowania dwutlenku węgla.

CO₂ STORAGE CAPACITY CLASSIFICATION AND SITE SELECTION CRITERIA

Key words

CO₂ storage capacity, classification, site storage selection criteria

Abstract

Geological storage is one of methods to neutralize anthropogenic carbon dioxide emissions. Implementation of the method requires number of issues to be elaborated, including storage capacity classification and the CO₂ storage site selection criteria.

Storage capacity classifications presently applied are based on the allocation of oil and natural gas resources and the reserve-resource pyramid concept. Storage capacity classification elaborated by the Carbon Sequestration Leadership Forum for CO₂ storage capacity applies techno-economic resource-reserve pyramid, in which four categories of storage capacities are assigned: theoretical, effective, practical and matched.

Storage capacity distributions, proposed by CO2CRC and the one suggested in this article, both are based on the reserve-resource modified capacity pyramid basing on the SPE hydrocarbon resource classification, regarding estimation uncertainty. According to the CO2CRC classification total pore volume is divided into prospective, contingent and operational storage capacity. According to the distribution of storage capacity proposed in this paper, within theoretical storage capacity there are singled out following categories: effective, conditional and unavailable storage capacity.

Selecting of structures to store carbon dioxide is based on criteria which are definable as a set of geological, reservoir and technical parameters that geological structure, prospective as a CO₂ sink, needs to meet. Presented primary requirements to be met by a carbon dioxide storage site follow: sufficient occurrence depth, good storage formation reservoir parameters, large CO₂ storage capacity, tight, unfaulted seal of low permeability, small distance from the emitter. These criteria serve to preliminary select a storage site. Later on, due to further of assesion of CO₂ storage formation, one should conduct detailed analyses, basing on the outline presented in the Directive on geological storage of carbon dioxide.