

Jerzy STOPA*, Paweł WOJNAROWSKI**, Stanisław RYCHLICKI***, Piotr KOSOWSKI****

Prognoza wpływu podziemnego składowania dwutlenku węgla na koszty wytwarzania energii elektrycznej

STRESZCZENIE. Widoczne zmiany klimatyczne obserwowane w ostatnim czasie związane są ze wzrostem zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze powodowanym działalnością człowieka. Hipoteza globalnego ocieplenia nie jest w pełni potwierdzona ale podejmowanych jest wiele prób redukcji emisji CO₂ do atmosfery. Jednym z nich jest zatłaczanie CO₂ do warstw geologicznych. Do zalet podziemnego składowania CO₂ zaliczyć można duże pojemności możliwych magazynów a także ich ekologiczne bezpieczeństwo. Separacja CO₂ z gazów spalinowych, kompresja, transport rurociągami i składowanie zwiększa koszty produkowanej energii, ale w przypadku składowania w złożach węglowodorów może również generować dodatkowe przychody oraz zmniejszenie obciążeń z tytułu kar i opłat za emisję. W artykule autorzy podjęli próbę określenia wpływu sekwestracji geologicznej na koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych. Przedstawiono symulację zatłaczania do złoża całkowitej emisji CO₂ z jednej z polskich elektrowni (z wydatkiem 15 000 t/d). Koszt składowania dwutlenku węgla oszacowano za pomocą symulacji komputerowej metodą Monte Carlo.

SŁOWA KLUCZOWE: geologiczna sekwestracja dwutlenku węgla, koszty produkcji energii elektrycznej, metoda Monte Carlo.

* Dr hab. inż., ** Dr inż., *** Prof. dr hab. inż., **** Mgr inż. — Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

Recenzent: dr hab. inż. Radosław TARKOWSKI

Wprowadzenie

Widoczne zmiany klimatyczne obserwowane w ostatnim czasie wiązane są ze wzrostem zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze powodowanym działalnością człowieka. Skutkuje to powstaniem szeregu programów mających na celu redukcję emisji CO₂ do atmosfery. Jednym z nich jest zatłaczanie CO₂ do warstw geologicznych. Rozwiązanie to stosowane jest w kilku krajach z bardzo dobrym wynikiem. Pierwotnie proces przechwytywania CO₂ nie był wykorzystywany w związku z zagrożeniem efektem cieplarnianym. W latach siedemdziesiątych XX wieku, w USA powstało kilka fabryk, mających na celu produkcję czystego dwutlenku węgla, który miał być wtłaczany do złóż ropy naftowej w celu zwiększenia jej wydobywania. Jednakże spadek cen ropy w połowie lat osiemdziesiątych uczynił to przedsięwzięcie nieopłacalnym. W połowie lat dziewięćdziesiątych, w Norwegii uruchomiono pierwszy komercyjny projekt składowania CO₂, pochodzącego ze złóż gazu ziemnego, który po przechwyceniu wtłaczany był pod dno Morza Północnego. Główną przyczyną tej inwestycji była obowiązująca w Norwegii, bardzo wysoka opłata za emisję CO₂ do atmosfery.

Do zalet podziemnego składowania CO₂ zaliczyć można duże pojemności możliwych magazynów a także ich ekologiczne bezpieczeństwo. Separacja CO₂ z gazów spalinowych, kompresja, transport rurociągami i składowanie zwiększa koszty produkowanej energii, ale w przypadku składowania w złożach węglowodorów może również generować dodatkowe przychody oraz zmniejszenie obciążeń z tytułu kar i opłat za emisję, które przy narastającym problemie „efektu cieplarnianego” mają znacznie wzrosnąć w najbliższych latach.

W artykule autorzy podjęli próbę określenia wpływu sekwestracji geologicznej na koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych. W związku z dużą rozpiętością potencjalnych kosztów oraz nakładów inwestycyjnych do określenia kosztu składowania dwutlenku węgla posłużono się symulacją komputerową za pomocą metody Monte Carlo.

1. Określenie możliwości magazynowych złoża

W przypadku wykorzystania złóż węglowodorów w procesie sekwestracji istotnym zagadnieniem jest określenie ich pojemności magazynowej, która jest parametrem determinującym przydatność danej struktury do tego rodzaju działań. Jest to ważne z punktu widzenia emitenta, którym może być elektrownia, dążącego do zapewnienia sobie pewnego i długookresowego miejsca składowania. W pracy przedstawiono obliczenia oparte na metodzie bilansu masy dla jednego z polskich złóż gazu ziemnego będącego w późnej fazie eksploatacji.

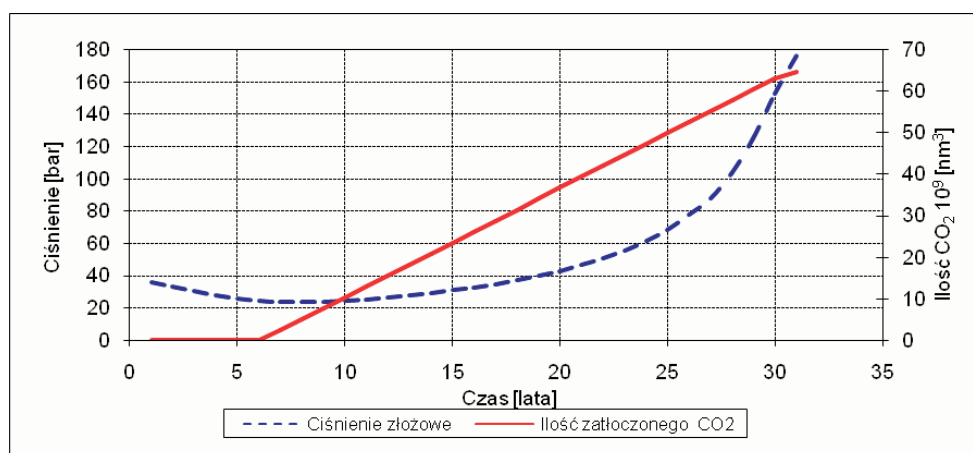
Na podstawie skalibrowanego do dotychczasowego przebiegu eksploatacji modelu bilansowego złoża, wykonano wariantowe obliczenia prognostyczne mające na celu oszacowanie

ilości CO₂ możliwej do zatłoczenia do analizowanego złoża. Jako maksymalne ciśnienie złożowe, w obliczeniach przyjęto wartość ciśnienia początkowego przewyższonego o 20%, co jest wartością przyjmowaną jako dopuszczalną w przypadku innych pobliskich złóż o podobnej budowie geologicznej.

Przyjęty schemat eksploatacji zapewnia dalsze wydobywanie w ciągu najbliższych 10 lat zgodnie z aktualnymi planami wydobywania ze złoża.

W obu przypadkach przyjęto stały wydatek tłoczenia CO₂ na poziomie 15 000 t/dobę, przy czym w wariantcie I zabieg zatłaczania rozpoczęto po 6 latach eksploatacji, a więc w trakcie trwania dalszego wydobywania. W wariantcie II zatłaczanie CO₂ rozpoczyna się po zakończeniu eksploatacji złoża.

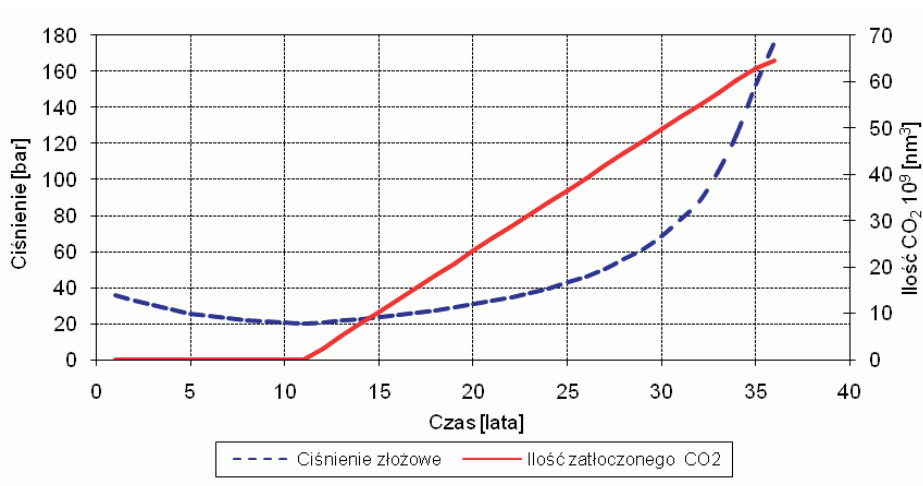
Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono zależność średniego ciśnienia złożowego od ilości zatłoczonego CO₂ dla analizowanych wariantów.



Rys. 1. Zmiany ciśnienia złożowego oraz ilość CO₂ zatłoczonego do złoża w wariantcie I

Fig. 1. Reservoir pressure and amount of injected CO₂ – variant I

Jak widać z przedstawionych wykresów, przyjęte schematy zatłaczania nie mają wpływu na całkowitą ilość CO₂ zatłoczonego do złoża, wpływają natomiast na zmiany ciśnienia w trakcie prowadzenia zabiegu. W obu przypadkach objętość zatłoczonego dwutlenku węgla przy końcowym ciśnieniu złożowym na poziomie 176 bar wynosi $64,6 \cdot 10^9 \text{ nm}^3$, co daje około $127 \cdot 10^6 \text{ ton CO}_2$. Całkowite napełnienie złoża nastąpiło w obu przypadkach po 24 latach. Prowadzenie równoczesnego zatłaczania CO₂ i wydobywania gazu ziemnego wiąże się jednak z dodatkowym ryzykiem zbyt szybkiego przebicia się zatłaczanego dwutlenku węgla do odwiertów produkcyjnych. Dlatego też konieczne jest w tym przypadku zapewnienie bezpiecznej odległości między strefą zatłaczania i produkcyjną uniemożliwiającej zachodzenie tych niepożądanych zjawisk w trakcie prowadzenia wydobywania. Z tego punktu widzenia korzystniejszy wydaje się wybór złóż w końcowej fazie eksploatacji.



Rys. 2. Zmiany ciśnienia złożowego oraz objętości CO₂ zatłoczonego do złoża w wariantcie II

Fig. 2. Reservoir pressure and amount of injected CO₂ – variant II

2. Metoda Monte Carlo

Metoda ta została opracowana w końcowych latach II wojny światowej w Stanach Zjednoczonych przez matematyków – J. von Neumanna i S. Ulama podczas prac nad skonstruowaniem bomby atomowej. Jest to sposób rozwiązywania zagadnień matematycznych drogą tzw. modelowania statystycznego, polegający na dobieraniu do rozwiązywanego problemu takiego procesu losowego, którego parametry statystyczne (liczby charakteryzujące ogólne własności rozkładu prawdopodobieństwa, jak np. wartość oczekiwana zmiennej losowej) przybliżałyby poszukiwane wartości rozwiązań. Metoda ta znajduje zastosowanie do problemów, których rozwiązanie metodami bezpośrednimi nie byłoby wykonalne lub prowadziłyby do zbyt skomplikowanych lub żmudnych rachunków. Jest ona szczególnie przydatna, gdy nie ma możliwości sformułowania analitycznych zależności, pozwalających na ocenę badanego parametru. W uproszczeniu ideą tej metody jest przeprowadzenie dużej liczby prób, podczas których losuje się dane wejściowe i oblicza badaną wielkość. Każda z danych wejściowych jest zmienną losową, posiadającą zdefiniowany rozkład. Po wylosowaniu wszystkich zmiennych oblicza się wartość szukaną i cały proces jest powtarzany. Po przeprowadzeniu dużej ilości prób otrzymuje się zestaw wartości badanej cechy, który można przedstawić w postaci histogramu, dopasować do odpowiedniego rozkładu, otrzymać dystrybuantę, wartość oczekiwaną oraz inne statystyki (Ikoku 1985).

3. Szacowanie kosztów podziemnego składowania CO₂

Do oszacowania kosztów podziemnego składowania dwutlenku węgla została zastosowana metoda zdyskontowanych przepływów pieniężnych (NPV), przy czym nakłady inwestycyjne, koszty stałe i zmienne zostały potraktowane jako zmienne losowe. Przyjęto trójkątne rozkłady prawdopodobieństwa dla zmiennych losowych, a ich parametry przedstawia tabela 1.

TABELA 1. Parametry zmiennych losowych wykorzystanych w obliczeniach kosztu podziemnego składowania dwutlenku węgla

TABLE 1. Parameters of random variables used to evaluate costs of CO₂ sequestration

Nazwa	Rodzaj rozkładu	Minimum	Wartość najbardziej prawdopodobna	Maksimum
Koszty stałe [zł/rok]	Trójkątny	1 800 000	2 000 000	2 200 000
Koszty zmienne [zł/tys. m ³]	Trójkątny	15	20	25
Nakłady inwestycyjne I [zł]	Trójkątny	90 000 000	100 000 000	130 000 000
Nakłady Inwestycyjne II [zł]	Trójkątny	15 000 000	20 000 000	30 000 000

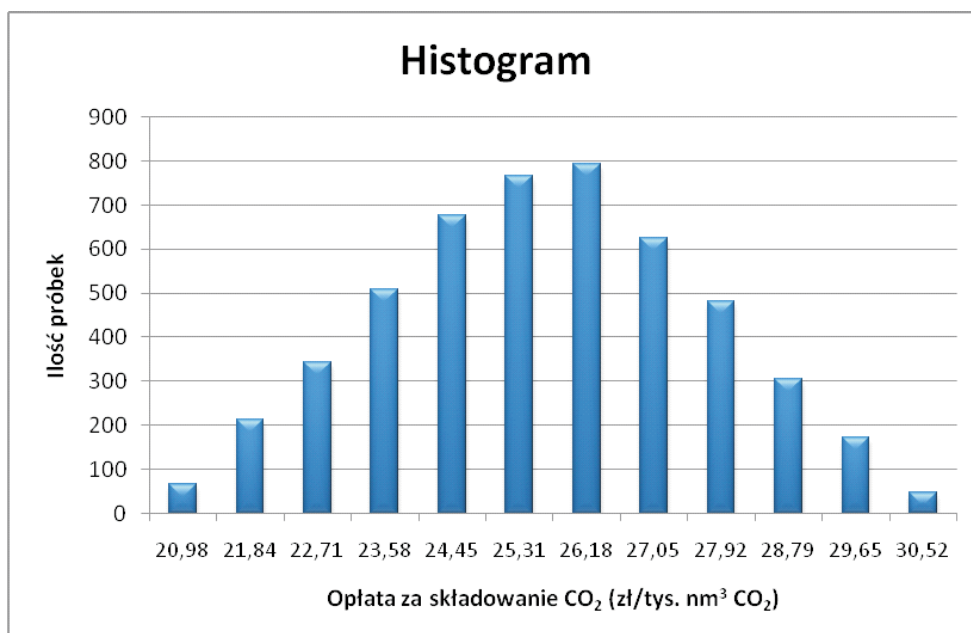
Nakłady inwestycyjne I to te, które ponoszone są na początku okresu zatłaczania, natomiast „nakłady inwestycyjne II”, związane z rekonstrukcjami odwiertów i remontami, ponoszone są w 9 roku zatłaczania. Pozostałe założenia to:

- ✧ stopa dyskontowa – 8%,
- ✧ roczna stawka amortyzacji – 7%,
- ✧ analizowany okres – 24 lata.

Symulacja metodą Monte Carlo została przeprowadzona komputerowo z zastosowaniem stworzonej przez autorów niniejszego artykułu aplikacji. Przeprowadzono 5 000 prób, a podczas każdej z nich losowano, według odpowiednich rozkładów, wartości zmiennych losowych, obliczano wartość NPV, a następnie dla przyjętej stopy dyskontowej znajdowano taką opłatę za składowanie CO₂, aby wartość NPV wyniosła zero. Zebrane wyniki dla wszystkich prób posłużyły do stworzenia histogramu, dystrybucyj oraz wyznaczenia wartości podstawowych statystyk. Wyniki przedstawiono w przeliczeniu na 1 tys. nm³ CO₂ oraz na 1 kW·h energii elektrycznej, przyjmując, że przy produkcji 1 kW·h w elektrowni węglowej dochodzi do emisji 0,95 kg CO₂ (Spalding 2005).

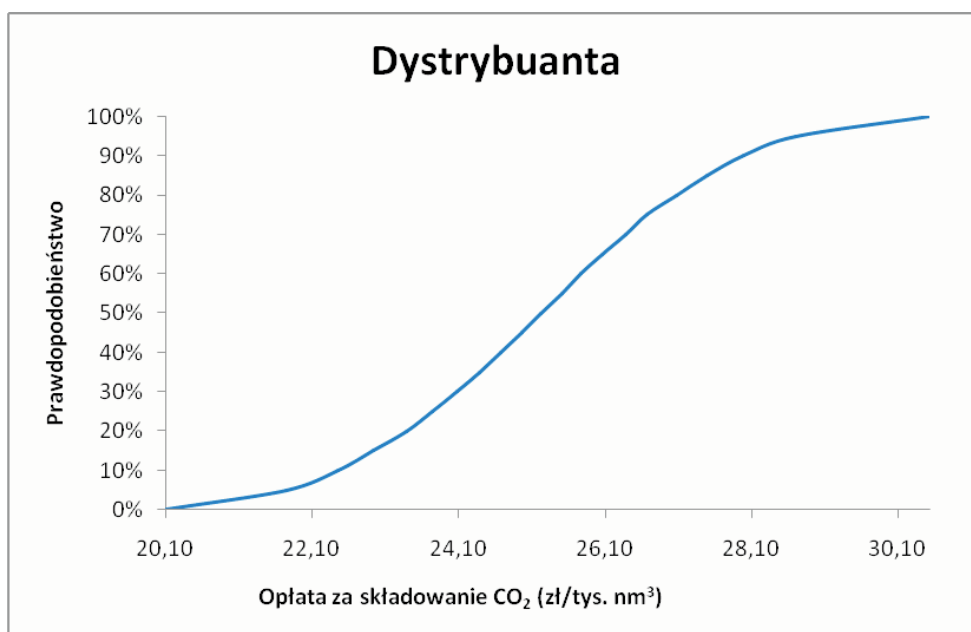
Wyniki symulacji przedstawiają rysunki 3 i 4 oraz tabele 2 i 3.

Opłata za składowanie waha się od 20,108 do 30,522 zł za tys. m³ CO₂, co zgodnie z przyjętymi założeniami daje od 0,96 do 1,21 gr. na 1 KW·h wyprodukowanej energii. Średnia i mediana są do siebie zbliżone i wynoszą odpowiednio 25,225 i 25,229 zł na tys. m³ CO₂, czyli 1,21 gr na 1 kW·h. Istnieje 50% prawdopodobieństwa, iż cena za składowanie



Rys. 3. Histogram opłaty za składowanie dwutlenku węgla

Fig. 3. Histogram of price for CO₂ sequestration



Rys. 4. Dystrybuanta opłaty za składowanie dwutlenku węgla

Fig. 4. Cumulative Distribution Function of price for CO₂ sequestration

TABELA 2. Wartości dystrybuanty opłaty za składowanie dwutlenku węgla

TABLE 2. Values of Cumulative Distribution Function of price for CO₂ sequestration

Prawdopodobieństwo	Koszt składowania	
	zł/tys. nm ³	zł/kW·h
5%	21,75	0,0104
10%	22,45	0,0108
15%	22,94	0,0110
20%	23,39	0,0112
25%	23,75	0,0114
30%	24,08	0,0116
35%	24,38	0,0117
40%	24,67	0,0118
45%	24,96	0,0120
50%	25,23	0,0121
55%	25,52	0,0122
60%	25,78	0,0124
65%	26,05	0,0125
70%	26,38	0,0127
75%	26,66	0,0128
80%	27,07	0,0130
85%	27,49	0,0132
90%	27,98	0,0134
95%	28,69	0,0138

TABELA 3. Wybrane statystyki wyników symulacji

TABLE 3. Selected statistics of simulation

Statystyka	zł/tys. nm ³	zł/kW·h
Min	20,108	0,0096
Max	30,522	0,0146
Średnia	25,225	0,0121
Odchylenie Std.	2,066	0,0010
Wariancja	4,270	0,0020
Mediana	25,229	0,0121

będzie niższa i takie samo prawdopodobieństwo, że będzie wyższa. Z prawdopodobieństwem 90% cena za geologiczną sekwestrację dwutlenku węgla, zgodnie z przyjętymi założeniami, będzie się mieściła w przedziale od 22,45 do 27,98 zł za tys. m³ CO₂, czyli od 1,08 do 1,34 gr. na 1 kW·h energii elektrycznej wyprodukowanej w elektrowni węglowej.

Podsumowanie

Komputerowa symulacja metodą Monte Carlo to bardzo wydajne narzędzie w przypadku analiz, uwzględniających niepewność i ryzyko. Przy wyznaczaniu ceny za składowanie dwutlenku węgla w jednym z polskich złóż gazu ziemnego, znajdującym się w końcowej fazie eksploatacji, metoda ta jest bardzo przydatna. Nie można bowiem jednoznacznie określić dokładnych wielkości nakładów inwestycyjnych oraz kosztów stałych i zmiennych podczas eksploatacji magazynu CO₂. Symulacja metodą Monte Carlo pozwala na przyjęcie obciążonych niepewnością parametrów za zmienne losowe i uzyskanie wyniku, który nie jest dokładną liczbą, lecz przedziałem z określonymi prawdopodobieństwami wystąpienia.

W artykule wykazano, iż istnieją geologiczne możliwości składowania przez przynajmniej 24 lata całej emisji dwutlenku węgla elektrowni węglowej.

Najpoważniejszym problemem są koszty takiego rozwiązania. Dla analizowanego złoża koszty składowania z 90% prawdopodobieństwem mieszczą się w przedziale od 22,45 do 27,98 zł za tys. m³ CO₂, czyli od 1,08 do 1,34 gr na 1 kW·h. Koszty te nie obejmują separacji dwutlenku węgla ze spalin oraz transportu na miejsce składowania.

Aspekt ekonomiczny dla podziemnego składowania dwutlenku węgla ma decydujące znaczenie. W przypadku wysokich opłat za prawa do emisji CO₂ oraz przy zastosowaniu efektywnych ekonomicznie sposobów separacji dwutlenku węgla ze spalin, geologiczna sekwestracja może okazać się korzystną alternatywą dla dużych, przemysłowych emitentów.

Literatura

- [1] IKOKU CHI U., 1985 — Economic analysis and investment decision. John Wiley & Sons, New York.
- [2] SPALDING D., 2005 — Węgiel, nowe paliwo ekologiczne? „Elektroenergetyka” nr 4.

Jerzy STOPA, Paweł WOJNAROWSKI, Stanisław RYCHLICKI, Piotr KOSOWSKI

Forecast of influence of carbon dioxide geological sequestration on electricity production costs

Abstract

Problem of anthropogenic emission of carbon dioxide becomes more and more seriously treated. The hypothesis of global warming is not fully confirmed but many efforts are taken to decrease emission of CO₂. One of them is geological storage in depleted gas and oil reservoirs and aquifers. There are many advantages of such solution: comparatively large storage capacities, ecological safety, knowledge and experience of oil companies. Separation of CO₂, compression, transport and storage increase the cost of electricity production but may decrease fines and fees for carbon dioxide emission.

In this paper authors present analysis of influence of geological storage on electricity production costs. The paper presents results of computer simulation in which total emission of CO₂ from one of the polish power stations (at rate 15 000 tons/d) was being injected into an oil reservoir for 24 years. The cost of storage was evaluated using Monte Carlo simulation.

KEY WORDS: geological sequestration of carbon dioxide, electricity production costs, Monte Carlo method