

Ocena efektywności geologicznego składowania CO₂ w poziomach wodonośnych jury dolnej Nizy Polskiego

Streszczenie

Celem pracy była ocena wpływu zmian wybranych czynników geologiczno-złożowych na efektywność składowania CO₂ dla wybranych struktur geologicznych w poziomach wodonośnych reprezentujących różne części basenu jury dolnej Nizy Polskiego, przy wykorzystaniu symulacji komputerowej zatłaczania dwutlenku węgla.

W rozdziale pierwszym omówiono podstawowe właściwości CO₂, scharakteryzowano uwarunkowania geologiczno-złożowe struktur geologicznych z przeznaczeniem do podziemnego składowania tego gazu oraz mechanizmy pułapkowania zachodzące podczas składowania dwutlenku węgla w głębokich poziomach wodonośnych.

W rozdziale drugim przedstawiono opisywane w literaturze metody szacowania pojemności oraz efektywności podziemnego składowania CO₂, w tym koncepcję piramidy podziemnego składowania tego gazu i związane z tym różne skale oszacowań pojemności składowania dwutlenku węgla. Scharakteryzowano dynamiczną pojemność składowania CO₂, pułapkowanie poprzez rozpuszczanie w wodzie, efektywność składowania CO₂ oraz pojęcie współczynnika efektywności składowania oraz czynniki, które na niego wpływają. Pozwoliło to na zaprezentowanie skali, w jakiej prowadzone są rozważania w tym zakresie – także prezentowane w pracy obliczenia na poziomie konkretnej dobrze rozpoznanej struktury geologicznej. Podkreślono, że wartości współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla podawane przez różnych autorów, mające wpływ na szacowanie efektywnej pojemności składowania CO₂ (dla konkretnej struktury), mieszczą się w bardzo szerokim zakresie: od <1% do >10%, a nawet wyższych niż 20%.

Rozdział trzeci poświęcono charakterystyce geologicznej wybranych trzech struktur antyklinalnych reprezentujących różne jednostki geologiczne w utworach permomezozoiku Nizy Polskiego: Konary (wał pomorsko-kujawski), Sierpc (niecka brzeźna) oraz Suliszewo (niecka szczecińsko-łódzka). Jako przedmiot badań wybrano poziom zbiornikowy warstw komorowskich jury dolnej lub jego odpowiednik. Wybrane struktury zostały dobrze rozpoznane, co pozwoliło na zbudowanie wiarygodnego modelu geologicznego każdej z nich. Struktury te znacząco różnią się od siebie wielkością, głębokością zalegania i parametrami petrofizycznymi poziomu zbiornikowego, co miało istotny wpływ na interpretację wyników. W związku z występowaniem w ich pobliżu przypuszczalnego uskoku, dla struktury Konary

oraz Sierpc powstały dwa warianty modeli geologicznych – wariant I zakładający brak uskoku oraz wariant II zakładający występowanie nieprzepuszczalnego uskoku.

W rozdziale czwartym w szczegółowej analizie wybranych trzech struktur pod kątem możliwości zatłaczania do nich dwutlenku węgla przedstawiono obliczenia teoretycznej pojemności składowania CO₂ dla poziomu zbiornikowego badanych struktur, przy skorzystaniu z czterech metod szacowania pojemności składowania: U.S. DOE, CSLF, USGS oraz CGSS. Określono również pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Sumując teoretyczną pojemność składowania oraz pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania, obliczono całkowitą teoretyczną pojemność składowania CO₂ dla wybranych struktur (bez uwzględniania współczynnika efektywności składowania). Drogą modelowania komputerowego, w 50 lokalizacjach otworu zatłaczającego, określono pojemność dynamiczną składowania dwutlenku węgla w analizowanych strukturach.

W ramach rozdziału piątego, na podstawie określonej wcześniej pojemności dynamicznej CO₂, w 50 lokalizacjach otworu zatłaczającego wyznaczono wartości współczynnika efektywności składowania dla każdej struktury. Otrzymane wartości pozwoliły na zbudowanie mapy pojemności dynamicznej składowania dwutlenku węgla oraz mapy współczynnika efektywności składowania tego gazu, dla każdej z rozważanych struktur. Zestawiono oraz porównano otrzymane współczynniki efektywności składowania CO₂ wszystkich struktur, a także wykonano analizę niepewności wyników badań.

Ostatnie dwa rozdziały (szósty i siódmy) poświęcono na przedstawienie dyskusji wyników, podsumowaniu przeprowadzonych badań oraz wnioskom.

Stwierdzono, iż największą teoretyczną pojemność składowania CO₂ ma struktura Suliszewo, kolejno struktura Konary, a najmniejszą struktura Sierpc. W przypadku szacowania pojemności składowania dwutlenku węgla metodą CSLF otrzymano odpowiednio wartości pojemności: 390,87 mln ton CO₂, 240,91 mln ton CO₂ oraz 205,41 mln ton CO₂. W oszacowaniach pojemności dynamicznej składowania tego gazu rozważanych struktur otrzymano identyczną kolejność. Analiza pojemności składowania dwutlenku węgla dla 50 lokalizacji otworu zatłaczającego przeprowadzona dla każdego z rozważanych obiektów pozwoliła otrzymać zakresy tych pojemności. Dla struktury Suliszewo wynosi on od 90,42 do 111,86 mln ton CO₂, dla struktury Konary 10,86–15,52 mln ton CO₂ (dla I wariantu) oraz 10,19–14,77 mln ton CO₂ (dla II wariantu), natomiast dla struktury Sierpc pojemność dynamiczna wynosi 0,21–1,16 mln ton CO₂ (dla I wariantu) oraz 0,21–1,07 (dla II wariantu). Spośród trzech analizowanych struktur, w przypadku Suliszewa stwierdzono

najkorzystniejsze warunki złożowe dla składowania dwutlenku węgla. Ograniczenia możliwej do zatłoczenia ilości tego gazu wynikają głównie z nadmiernego wzrostu ciśnienia w stropie struktury lub części stropowej poziomu zbiornikowego strefy przyotworowej otworu zatłaczającego, którego wartość mogłaby przekroczyć dopuszczalną wartość minimalnego ciśnienia kapilarnego. W przypadku zatłaczania CO₂ do struktury Suliszewo szczególną uwagę w pierwszym etapie zatłaczania (1 rok) zwrócono na wzrost ciśnienia na dnie otworu zatłaczającego, tak aby jego wzrost nie przekroczył ciśnienia szczelinowania. Wyniki pokazują, że zwiększenie liczby otworów zatłaczających dwutlenek węgla do struktury Konary oraz Suliszewo nie przyczyni się znacząco do zwiększenia pojemności składowania CO₂, a co za tym idzie – do zwiększenia współczynnika efektywności składowania rozpatrywanej struktury. W strukturze Sierpc, ze względu na słabe własności zbiornikowe, zatłaczanie kilkoma otworami może zwiększyć pojemność składowania dwutlenku węgla.

Największe wartości współczynnika efektywności składowania CO₂, w odniesieniu do metody CSLF, w zakresie 23,13–28,62%, uzyskano w przypadku struktury Suliszewo, zdecydowanie niższe dla struktury Konary, w zakresie 4,51–6,44% dla wariantu I oraz 4,23–6,13% dla wariantu II, natomiast najmniejsze wartości współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla, na poziomie 0,10–0,56% w wariacie I oraz 0,07–0,36% w wariacie II otrzymano w przypadku struktury Sierpc. Stwierdzono, że w miarę poprawy parametrów zbiornikowych większe znaczenie przy ocenie współczynnika efektywności składowania CO₂ ma lokalizacja otworu zatłaczającego.

Mapy pojemności dynamicznej składowania CO₂ oraz mapy współczynnika efektywności składowania tego gazu pokazują, iż największe ich wartości (w przypadku struktur Konary oraz Suliszewo) można otrzymać lokując otwór z dala od szczytu struktury, mając na uwadze odpowiednią odległość od wyznaczonego konturu struktury. W przypadku antykliny Sierpc sytuacja jest odwrotna – największą pojemność składowania, a zatem największą wartość współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla, można otrzymać lokując otwór zatłaczający w szczycie struktury. Spowodowane jest to najgorszymi właściwościami zbiornikowymi oraz największą głębokością poziomu zbiornikowego spośród rozpatrywanych trzech struktur. Oba fakty wpływają na mniejszą intensywność unoszenia się pióropusza CO₂ ku szczytowi struktury, a większą jego mobilność w kierunku poziomym, co może prowadzić do wycieku pióropusza dwutlenku węgla poza wyznaczony kontur struktury.

Przeprowadzone symulacje zatłaczania CO₂ pozwalają stwierdzić, iż najbardziej zbliżoną metodą oszacowania pojemności składowania tego gazu, w odniesieniu do wyników symulacji komputerowej, jest metoda US DOE wraz z czynnikami wpływającymi na wartość

współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla przedstawionymi w atlasie składowania CO₂ dla USA i Kanady oraz w formule zaproponowanej przez Goreckiego i współpracowników w 2009 roku. Formuła ta została rozszerzona przez autorkę pracy o trzy dodatkowe czynniki: położenie otworu zatłaczającego dwutlenek węgla do struktury (geometria struktury), który może pomniejszyć współczynnik efektywności składowania CO₂ o 31%, dopuszczalne ciśnienie kapilarne w stropie struktury, które obniża współczynnik efektywności składowania od 9 do 90% oraz obecność uskoku w sąsiedztwie struktury, który może spowodować obniżenie wspomnianego współczynnika efektywności do 15%.

Stwierdzono, iż porównanie współczynnika efektywności składowania CO₂ dla trzech różnych struktur nie pozwala zidentyfikować jednej uniwersalnej jego wartości, czy też zakresu wartości. Efektywność składowania dwutlenku węgla posiada zarówno przestrzenną, jak i czasową zależność. Dlatego też istotne jest, aby w ocenach pojemności składowania CO₂ określić odpowiedni obszar poziomu zbiornikowego i okres, w jakim będzie odbywało się zatłaczanie. Szczególną uwagę należy zwrócić na wzrost ciśnienia w stropie struktury w ten sposób, aby nie przekroczył dopuszczalnej wartości minimalnego ciśnienia kapilarnego. Zwiększenie liczby otworów zatłaczających dwutlenek węgla nie zawsze prowadzi do zwiększenia pojemności składowania, a co za tym idzie – do zwiększenia współczynnika efektywności składowania rozpatrywanej struktury. Wyjątkiem są struktury o słabych właściwościach zbiornikowych, gdzie możliwości zatłaczania CO₂ są zdecydowanie mniejsze w porównaniu ze strukturami o dobrych właściwościach zbiornikowych. W takich przypadkach zatłaczanie kilkoma otworami może zwiększyć pojemność składowania CO₂, a zatem i współczynnik efektywności składowania tego gazu.

Evaluation of the effectiveness of CO₂ geological storage in Lower Jurassic aquifers of the Polish Lowlands

Abstract

The aim of the work was to assess the impact of changes in some geological and reservoir factors on the CO₂ storage efficiency for selected geologic structures in aquifers representing various parts of the Lower Jurassic basin, using computer simulation of carbon dioxide injection.

The first chapter discusses the basic properties of CO₂ and characterizes the geological and reservoir conditions of geologic structures for the purpose of underground storage of this gas and the trapping mechanisms occurring during carbon dioxide storage in deep aquifers.

The second chapter presents the methods described in the literature for estimating the capacity and efficiency of underground CO₂ storage, including the concept of an underground storage pyramid of this gas and related different scales estimating the storage capacity of carbon dioxide. The dynamic CO₂ storage capacity, trapping by dissolving in brine, efficiency of CO₂ storage, as well as the concept of storage coefficient and factors influencing it are characterized. It allows presenting the scale of considerations in this area, including those provided in this work at the level of a well-recognized, specific geologic structure. It has been emphasized that carbon dioxide storage coefficients quoted by different authors, affecting the estimation of effective CO₂ storage capacity (for a specific structure), are within a very wide range: from <1 to >10%, and even higher than 20%.

The third chapter is devoted to the geological characteristics of three anticlinal structures representing various geological units in the Permian and Mesozoic of the Polish Lowlands: Konary (Pomeranian-Kujawian Swell), Sierpc (Marginal Trough) and Suliszewo (Szczecin-Łódź Trough). As the object of the research, the reservoir horizon of the Lower Jurassic Komorowo Beds or their equivalent was chosen. The selected structures are well recognized, which allowed building a reliable geological model of each of them. These structures differ significantly in size, depth and petrophysical parameters of the reservoir horizon, which had a significant impact on the results of interpretation. Due to the occurrence of a supposed fault near them, two variants of geological models were created for the Konary and Sierpc structure – variant I assuming no fault and variant II assuming the presence of an impermeable fault.

The fourth chapter presents a detailed analysis of calculations of theoretical CO₂

storage capacity of the three structures in terms of the possibility of carbon dioxide injecting, using four methods: U.S. DOE, CSLF, USGS and CGSS. The storage capacity resulting from dissolution of CO₂ in the formation water was also determined. By adding the theoretical storage capacity and the storage capacity resulting from the dissolution, the total theoretical CO₂ storage capacity for the structures was calculated (without taking into account the storage coefficient). By computer modelling, the dynamic storage capacity of carbon dioxide in the structures was determined at 50 injection well locations.

As part of the fifth chapter, the values of CO₂ storage coefficient were calculated at the 50 locations for each structure based on the previously determined dynamic capacity of CO₂. The obtained values allowed building maps of the dynamic carbon dioxide storage capacity and the storage efficiency of this gas for each of the structures. The obtained CO₂ storage coefficients of all structures were compared, and the uncertainty of the results was also analyzed.

The last two chapters (sixth and seventh) provide the results of discussion, a summary of the research, and conclusions.

It has been found that the Suliszewo structure shows the largest theoretical CO₂ storage capacity, followed by the Konary structure, and the Sierpc structure. Using the CSLF method, the estimated carbon dioxide storage capacities are 390.87, 240.91 and 205.41 million tonnes of CO₂, respectively. The estimated dynamic storage capacities of these structures are of the same order. The analysis of carbon dioxide storage capacity for 50 injection well locations, carried out for each of the structures allowed obtaining ranges of these capacities. For the Suliszewo structure it varies from 90.42 to 111.86 million tonnes of CO₂, for the Konary structure 10.86-15.52 million tonnes of CO₂ (for the first variant) and 10.19-14.77 million tonnes of CO₂ (for the second variant), while for the Sierpc structure, the dynamic capacity is 0.21-1.16 million tonnes of CO₂ (for the first variant) and 0.21-1.07 (for the second variant). Among the three structures, Suliszewo reveals the most favourable reservoir conditions for carbon dioxide storage. Limitations for the injection possibility of this gas result mainly from excessive pressure at the top of the structure or at the top of the reservoir horizon in the near-well areas, the value of which could exceed the minimum capillary threshold pressure. In the case of CO₂ injection into the Suliszewo structure, particular attention in the first injection stage (first year) was paid to the pressure increase at the bottom of the injection well, so that the increase could not exceed the fracturing pressure. The results show that the increase in the number of carbon dioxide injection wells for the Konary and Suliszewo structures will not significantly contribute to the increase of the CO₂

storage capacity, and thus to the increase the storage coefficient of these structures. In the Sierpc structure, injection with several injection wells can increase the storage capacity of carbon dioxide due to poor reservoir properties.

The largest values of CO₂ storage coefficient (using the CSLF method) in the range of 23.13-28.62%, were obtained in the Suliszewo structure. Much lower values were recorded for the Konary structure: 4.51-6.44% for variant I and 4.23-6.13% for variant II. The lowest values of the carbon dioxide storage coefficient: 0.10-0.56% in variant I and 0.07-0.36% in variant II, were obtained in the Sierpc structure. It has been found that as the reservoir properties improve, the location of the injection well is more important when assessing the CO₂ storage coefficient.

The maps of dynamic CO₂ storage capacity and storage coefficient of this gas show that the greatest values (in the Konary and Suliszewo structures) can be obtained by placing the injection well away from the top of the structure, considering the appropriate distance from the spill point. In the case of the Sierpc anticline, the situation is reversed - the largest storage capacity, and therefore the largest carbon dioxide storage coefficient, can be obtained by locating the injection well at the top of the structure. This is due to the worst reservoir properties and the largest depth of the reservoir horizon among the three considered structures. Both facts affect the lower intensity of CO₂ plume rising to the top of the structure, and its greater horizontal mobility, which may lead to carbon dioxide plume leakage beyond the spill point of the structure.

The CO₂ injection simulations allow stating that the most similar method of estimating storage capacity of this gas in relation to this simulation results is the US DOE method together with factors affecting the value of carbon dioxide storage coefficient presented in the CO₂ storage atlas for the USA and Canada and in the formula proposed by Gorecki and collaborators in 2009. This formula has been extended by the author of this work with three additional factors: (1) the location of the carbon dioxide injection well on the structure (geometry of the structure), which can reduce the CO₂ storage coefficient by 31%, (2) capillary threshold pressure at the top of the structure, which reduces the storage coefficient by 9–90%, and (3) the presence of a fault near the structure, which can reduce the mentioned storage coefficient to 15%.

It has been found that the comparison of CO₂ storage efficiency coefficient for three different structures does not allow identifying its one universal value or a range of values. The carbon dioxide storage efficiency has both spatial and temporal dependence. Therefore, it is important to determine the appropriate area of the reservoir horizon and the period of CO₂

injection during storage capacity assessments. Particular attention should be paid to the increase of pressure at the top of the structure to not exceed the permissible value of the capillary threshold pressure. The increase in the number of carbon dioxide injection wells does not always lead to the storage capacity increase, and thus to the increase of storage efficiency of considered structure. The exceptions are structures with poor reservoir properties, where the CO₂ injection possibility is much smaller compared to structures with good reservoir properties. In such cases, injection with several injection wells can increase the storage capacity of CO₂, and hence the storage coefficient of this gas.