

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Luboń
pt.: „Ocena efektywności geologicznego składowania CO₂
w poziomach wodonośnych jury dolnej Niżu Polskiego”
przygotowanej pod opieką dr hab. inż. Radosława Tarkowskiego, prof. IGSMiE –
promotor oraz dr inż. Bartosza Papiernika – promotor pomocniczy**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji było pismo dr hab. inż. Krzysztofa Galosa, prof. IGSMiE Dyrektora Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi PAN nr A0-520-10.2017 z dnia 12 grudnia 2018.

2. Celowość podjęcia tematu

Negatywny wpływ antropogenicznej emisji dwutlenku węgla, pochodzącej głównie ze spalania paliw kopalnych w celach energetycznych, jest faktem potwierdzonym rosnącą temperaturą na powierzchni Ziemi oraz nasileniem ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Emisję można ograniczyć poprzez zwiększenie efektywności energetycznej, oszczędność energii oraz wykorzystywanie do produkcji ciepła i energii elektrycznej niekonwencjonalnych źródeł energii. Innym rozwiązaniem problemu nadmiernej emisji CO₂ jest technologia wychwytu i składowania dwutlenku węgla w strukturach geologicznych. Technologia ta jest rozwijana od kilkadziesiąt lat. Uznaje się ją obecnie za strategiczną i niezbędną do ograniczenia antropogenicznej emisji tego gazu i łagodzenia skutków zmian klimatu. Polega na wychwyceniu CO₂ z gazów spalinowych lub przemysłowych i zatłoczeniu do struktury geologicznej (poziomu wodonośnego, złoża węglowodorów lub pokładu węgla) w celu permanentnego odizolowania.

Analizy wskazują, że największy potencjał składowania CO₂ mają głębokie poziomy wodonośne, w Polsce w strukturach tych może być składowana kilkuset letnia krajowa emisja tego gazu. Złoża węglowodorów i pokłady węgla mają mniejszy potencjał. Zatłaczanie CO₂ do tych struktur może umożliwić pozyskanie dodatkowych ilości ropy lub gazu ziemnego.

Wybór najlepszych lokalizacji dla geologicznego składowania CO₂ uwzględnia wiele elementów: lokalizację źródeł emisji, budowę geologiczną, warunki geotermiczne

i hydrodynamiczne, aspekty ekonomiczne, prawne i inne. Jednym z istotnych czynników decydujących o możliwości utworzenia w strukturze geologicznej składowiska CO₂ jest jej pojemność. Pod pojęciem pojemności składowania CO₂ rozumie się ilość dwutlenku węgla, jaka może być zatłoczona do danej struktury, bezpiecznie i bez skutków ubocznych dla środowiska.

Pojemność składowania jest szacowana w różnych skalach, od skali kraju, przez skalę basenu sedimentacyjnego po pojedyncze struktury geologiczne. Uzyskane rezultaty wykazują duże rozbieżności wynikające z różnych przyczyn (metodyki obliczeń, jakości danych, rodzajów mechanizmów pułapkowania CO₂ i innych). Znaczący wpływ na otrzymywane wyniki ocen pojemności składowania ma wykorzystywany w obliczeniach współczynnik efektywności składowania dwutlenku węgla. Efektywność geologicznego składowania CO₂ definiowana jest jako ułamek objętości przestrzeni porowej zbiornika, jaki może być wypełniony przez ten gaz. Zależy ona od cech petrofizycznych skał, geometrii struktury, właściwości fizykochemicznych wód, a także parametrów złożowych (ciśnienia i temperatury).

Wymienione wyżej uwarunkowania konieczne przy ocenie wpływu wybranych czynników geologiczno-złożowych na efektywność składowania CO₂, przedstawiła mgr inż. Katarzyna Luboń we wstępie swojej pracy. Zdaniem Doktorantki efektywność składowania CO₂ w poziomach zbiornikowych jury dolnej Niżu Polskiego zależna jest między innymi od: geometrii struktury oraz dopuszczalnego wzrostu ciśnienia w strukturze wywołanego zatłaczaniem dwutlenku węgla, czynników dotychczas nie analizowanych.

Jako cel rozprawy Doktorantka postawiła sobie wykonanie oceny wpływu geometrii struktury oraz dopuszczalnego wzrostu ciśnienia w strukturze wywołanego zatłaczaniem dwutlenku węgla na efektywność składowania dwutlenku węgla w poziomach zbiornikowych dolnej jury Niżu Polskiego. Przedmiotem analiz były utwory zbiornikowe jury dolnej - warstwy komorowskie i ich ekwiwalenty facjalne. Badania wykonano w trzech strukturach geologicznych (antyklinach: Konar, Sierpca i Suliszewa) zlokalizowanych w różnych jednostkach geologicznych: w niecce szczecińsko-łódzkiej, na wale pomorsko-kujawskim oraz w niecce brzeźnej.

3. Zakres rozprawy

Opiniowaną pracę mgr inż. Katarzyna Luboń przedstawiła na 154 stronach tekstu (8 rozdziałów), 54 rysunkach, 20 tabelach i 19 załącznikach.

Część ogólna pracy obejmuje dwa rozdziały (9 podrozdziałów), zawiera charakterystykę: właściwości CO₂, uwarunkowań geologiczno-złożowych struktur geologicznych przeznaczonych na składowiska tego gazu oraz mechanizmów pułapkowania działających podczas składowania w poziomach wodonośnych. Doktorantka bazując na literaturze omówiła metody oceny pojemności (w tym koncepcję piramidy podziemnego składowania i związane z nią różne skale oszacowań pojemności). W części ogólnej, w oparciu o literaturę, przedstawiła również zagadnienia efektywności podziemnego składowania CO₂ (w tym, czynniki wpływające na wielkość współczynnika efektywności składowania) Szczególną uwagę zwróciła na zróżnicowanie wartości współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla, które mają wpływ na ocenę efektywnej pojemności składowania CO₂ (dla konkretnej struktury).

Część badawcza pracy przedstawiona jest w rozdziałach 3, 4 i 5. Rozdział 3 (5 podrozdziałów) przedstawia charakterystykę geologiczną struktur antyklinalnych Konar (wał pomorsko-kujawski), Sierpca (niecka brzeźna) i Suliszewa (niecka szczecińsko-łódzka). Struktury te zostały wybrane w oparciu o wyniki prac badawczych nakierowanych na rozpoznanie miejsc odpowiednich do geologicznego składowania CO₂ na terenie Polski wykonanych w ostatnich kilkunastu latach. Charakterystyka obejmowała krótki opis budowy geologicznej, w którym szczególną uwagę zwrócono na parametry geologiczno-złożowe poziomu zbiornikowego (warstw komorowskich lub ich odpowiedników) oraz skał uszczelniających.. W oparciu o: dostępne dane otworowe, przekroje oraz mapy geologiczne zbudowano geologiczne modele przestrzenne analizowanych struktur. W modelowaniu wykorzystano, oszacowane przez Doktorantkę na podstawie interpretacji danych z profilowań geofizycznych, parametry zbiornikowe (porowatość i przepuszczalność) warstw komorowskich lub ich odpowiedników.

Rozdział 4 zawiera cztery podrozdziały, w których Doktorantka przedstawiła szczegółową analizę struktur pod kątem możliwości zatłaczania do nich dwutlenku węgla. Bazując na czterech metodach oceny pojemności składowania CO₂ opracowanych przez: Department of Energy US, Carbon Sequestration Leadership Forum, United States Geological Survey oraz CO₂ Geological Storage Solutions obliczyła i porównała teoretyczną pojemność składowania i pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie we wszystkich trzech strukturach (tab. 4.1-4.3 oraz rys. 4.1-4.3). Bazując na schemacie

obliczania dopuszczalnych ciśnień i naprężeń dla podziemnych magazynów gazu Doktorantka oszacowała dopuszczalny wzrost ciśnienia związany z zatłaczaniem CO₂ (ciśnienia szczelinowania i kapilarnego) do analizowanego poziomu zbiornikowego we wszystkich trzech strukturach. W oparciu o modele geologiczne sporządzone dla struktur Konary, Sierpc oraz Suliszewo wyznaczyła pojemności dynamiczne składowania dwutlenku węgla metodą symulacji zatłaczania tego gazu. Na podstawie wyników symulacji wykreśliła mapy pojemności dynamicznej składowania CO₂ dla każdej z analizowanych struktur (tab. 4.4-4.6 oraz rys. 4.5-4.19).

W rozdziale 5 (3 podrozdziałach) Doktorantka przedstawiła ocenę efektywności składowania CO₂ dla struktur: Konary, Sierpc i Suliszewo. Na podstawie, wyznaczonej modelowaniem, pojemności dynamicznej składowania CO₂ określiła, dla każdej z analizowanych struktur, zakresy współczynników efektywności składowania dwutlenku węgla (tab. 5.2-5.4). Obliczenia niepewności wyników oszacowań współczynników efektywności składowania przeprowadziła w oparciu o prawo propagacji niepewności (tab. 5.5). W celu zobrazowania potencjału składowania poszczególnych struktur wykonała dla każdej z nich mapy współczynnika efektywności składowania (rys. 5.1-5.3). Porównała współczynniki efektywności składowania CO₂ w analizowanych strukturach obliczone metodą CSLF/CGSS ze współczynnikami uzyskanymi z symulacji komputerowej (tab. 5.5-5.8 oraz rys. 5.4).

Rozdział 6 zawiera dyskusję wyników uzyskanych przez Doktorantkę, rozdział 7 stanowi podsumowanie i wnioski przeprowadzonych prac.

Przedstawiony spis literatury zawiera 143 pozycje bibliograficznych, w tym prace niepublikowane.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Metodyka pracy

Doktorantka przedstawiła studium materiałów źródłowych, które stanowiło analizę zagadnień dotyczących pojemności oraz efektywności składowania CO₂ w głębokich poziomach wodonośnych.

Bazując na obecnym stanie rozpoznania oraz własnych analizach (właściwości petrofizycznych poziomu zbiornikowego) wykonała charakterystykę geologiczno-złożową antyklin Konar, Sierpca i Suliszewa, która posłużyła do sporządzenia modeli geologicznych (statycznych) utworów jury dolnej (formacji komorowskiej i jej odpowiedników). Modele geologiczne Doktorantka opracowała w oparciu o programy Surfer oraz PetraSim TOUGH2.

Mgr Luboń wykonała symulację zatłaczania dwutlenku węgla mającą na celu oszacowanie pojemności dynamicznej struktur: Konar, Sierpca i Suliszewa, przy wykorzystaniu programu PetraSim TOUGH2. Jest to symulator złożowy przepływu płynów jedno- i wielofazowych izo- i nieizotermicznych stosowany w inżynierii złożowej, geotermii oraz składowaniu dwutlenku węgla. Program umożliwia modelowanie przepływów mieszanin wody, soli (NaCl) i dwutlenku węgla. Moduł ECO2N pozwala na analizę przepływów wielofazowych, wymianę ciepła oraz reakcje chemiczne zachodzące podczas zatłaczania CO₂. Do symulacji zatłaczania CO₂ w programie PetraSim TOUGH2 wykorzystano siatkę wielokątną, bazującą na podziale komórek metodą Voronoi. Symulację zatłaczania dwutlenku węgla przeprowadzono przy następujących założeniach: zatłaczanie jednym otworem pionowym dla pięćdziesięciu różnych lokalizacji, odległość poszczególnych otworów do granicy struktury była większa lub równa 1 km. Dwutlenek węgla będzie zatłaczany całym interwałem poziomu zbiornikowego ze stałą, maksymalną wydajnością. Przyjęte ciśnienie zatłaczania było mniejsze niż ciśnienie szczelinowania i ciśnienie kapilarne w części stropowej struktury. Założono także, że dwutlenek węgla nie będzie migrował poza kontur struktury (nasylenie skał CO₂ w strefie konturu będzie poniżej 10%). Modelowanie wykonano dla 31 lat zatłaczania CO₂ dla każdej ze struktur (zatłaczanie testowe – 1 rok oraz zatłaczanie docelowe - 30 lat). Wykonano także symulację monitoringu migracji CO₂ oraz zmian ciśnienia w strukturach po zatłoczeniu do nich dwutlenku węgla przez okres 1000 lat dla wszystkich lokalizacji otworu iniekcyjnego. Wyniki modelowania dynamicznego przedstawiono w postaci map pojemności dynamicznej składowania dwutlenku węgla. Do określenia niepewności wyników oszacowania współczynnika efektywności składowania CO₂ wykorzystano prawo propagacji niepewności.

Doktorantka przeanalizowała wielkości współczynników efektywności składowania CO₂ otrzymane metodą modelowania dynamicznego wykorzystując wykresy pudełkowe Tukeya pokazujące poziom półtora rozstępu kwartylnego. Wykresy wykonano po jednym dla każdego wariantu modelowania: Konary (wariant I), Konary (wariant II), Sierpc (wariant I), Sierpc (wariant II) oraz Suliszewo. Na wykresach zaznaczono punkty prezentujące dane wejściowe - wartości współczynnika efektywności składowania CO₂, w zależności od odległości otworu zatłaczającego dwutlenek węgla od szczytu struktury. Dla tych punktów (dla poszczególnych wariantów) wyznaczono linię trendu, jej równanie, a także wartość współczynnika determinacji.

Zagadnienia naukowe rozwiązane samodzielnie przez Doktorantkę

Najważniejszą część rozprawy stanowią rozdziały: 3, 4 oraz 5 prezentujące rezultaty samodzielnej pracy Doktorantki. Przedstawiają one wyniki pracy, do których należą:

- wykonanie modeli geologicznych utworów formacji komorowskiej dolnej jury w strukturach: Konar, Sierpca i Suliszewa,
- oszacowanie teoretycznej pojemności składowania i pojemności składowania wynikającej z rozpuszczania CO₂ w wodzie we wszystkich trzech strukturach metodami opracowanymi przez: DOE US, CSLF, USGS oraz CGSS,
- wyznaczenie pojemności dynamicznej składowania CO₂ dla struktur: Konary, Sierpc i Suliszewo (uwzględniającej ograniczenia związane ze wzrostem ciśnienia szczelinowania i kapilarnego) metodą symulacji zatłaczania dwutlenku węgla,
- opracowanie algorytmu postępowania przy wyznaczaniu dynamicznej pojemności składowania,
- określenie, najbardziej zbliżonego do rzeczywistości, współczynnika efektywności składowania CO₂ na podstawie porównania teoretycznej całkowitej pojemności składowania z pojemnością dynamiczną otrzymaną w wyniku symulacji zatłaczania dwutlenku węgla dla trzech antyklin Konar, Sierpca i Suliszewo.

Oryginalność pracy polega na:

- opracowaniu map pojemności dynamicznej składowania CO₂ utworów zbiornikowych jury dolnej (formacji komorowskiej i jej ekwiwalentów),
- opracowaniu map współczynnika efektywności składowania CO₂ w utworach zbiornikowych jury dolnej (formacji komorowskiej i jej ekwiwalentów),
- opracowaniu algorytmu postępowania przy wyznaczaniu dynamicznej pojemności składowania dwutlenku węgla,
- modyfikacji metody oceny współczynnika efektywności składowania CO₂ US DOE poprzez dodanie trzech nowych czynników, do których należą: położenie otworu zatłaczającego, dopuszczalny wzrost ciśnienia kapilarnego w strefie przyotworowej, i w szczycie struktury wywołany zatłaczaniem gazu oraz występowanie barier (uskoków) w sąsiedztwie struktur przeznaczonych do składowania.

Biorąc pod uwagę: dobór tematyki badawczej, cel rozprawy oraz zastosowane metody i uzyskane rezultaty wyrażam przekonanie, że:

- rozpatrywany przez Doktorantkę problem badawczy – ocena wpływu wybranych parametrów geologiczno-złożowych na efektywność składowania CO₂ w utworach zbiornikowych dolnej jury Niżu Polskiego stanowi zagadnienie naukowe w dyscyplinie „Górnictwo i geologia inżynierska”,
- problem badawczy obejmujący określenie efektywności składowania dwutlenku węgla w utworach zbiornikowych dolnej jury Niżu Polskiego metodą symulacji komputerowej oraz ocena wpływu poszczególnych parametrów na pojemność składowania został rozwiązany poprawnie i samodzielnie,
- praca zawiera nowe elementy: opracowany przez Autorkę algorytm postępowania przy wyznaczaniu dynamicznej pojemności składowania dwutlenku węgla oraz modyfikację metody analitycznej DOE US szacowania współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla,
- poprawnie dobrano i zastosowano metody badawcze oraz poprawna jest interpretacja wyników symulacji i analiz.

5. Uwagi dyskusyjne i wątpliwości

Po zapoznaniu się z ocenianą pracą doktorską nasunęły mi się pewne wątpliwości oraz pytania:

- Czy konieczne było formułowanie zaproponowanej we wstępie tezy: „efektywność składowania CO₂ w poziomach zbiornikowych basenu sedymentacyjnego jury dolnej Niżu Polskiego zależna jest w znaczący i różnicowany sposób od parametrów, takich jak: geometria struktury (w prezentowanej pracy przedstawiona jako położenie otworu zatłaczającego) oraz dopuszczalny wzrost ciśnienia w strukturze na skutek zatłaczania”, która wydaje się oczywista; w przypadku pracy polegającej na ocenie wpływu czynników geologiczno-złożowych na efektywność składowania CO₂ wystarczyłoby sformułowanie tylko celu dysertacji.
- W rozdziale 2 zbyt szeroko opisano piramidy pojemności składowania, do których Autorka nie odnosi się w dalszej części pracy, co niepotrzebnie zwiększa objętość pracy.
- Opisane w rozdziale 2.6 czynniki wpływające na efektywność składowania (Bachu 2015) wymagają uporządkowania.
- Modelowania (statyczne i dynamiczne) wykonano w oparciu o 10 warstw wydzielonych w obrębie formacji komorowskiej; w opisach poszczególnych struktur,

oraz w części dotyczącej porównania parametrów petrofizycznych w analizowanych antyklinach (rozdział 3) brakuje odniesienia do parametrów (miąższości, porowatości i przepuszczalności) wydzielonych warstw.

- Wartość dopuszczalnego wzrostu ciśnienia związanego z zatłaczaniem CO₂ przyjęto na podstawie danych pochodzących z magazynu gazu wykonanego w utworach fliszowych (Swarzów). Czy Doktorantka spotkała się z innymi metodami określania dopuszczalnego ciśnienia zatłaczania?
- W zamieszczonym w rozdziale 4.4 schemacie postępowania przy wyznaczaniu dynamicznej pojemności składowania dwutlenku węgla są błędy w opisie poszczególnych bloków.
- W rozdziale 5.3. Doktorantka zaproponowała, bazując na porównaniu współczynników efektywności składowania wyznaczonych metodami analitycznymi i symulacją komputerową (empirycznie), uwzględnienie we wzorze na ten współczynnik dodatkowych czynników związanych ze wzrostem ciśnienie, położeniem otworu oraz obecnością uskoku. W jaki sposób dobrano wielkości wprowadzonych zmiennych w analizowanych strukturach? Czy przy dobieraniu tych wartości nie należałoby wykonać analizę wrażliwości danych wykorzystanych w symulacji?
- W rozdziale 6 dotyczącym dyskusji wyników Doktorantka odniosła się do publikacji i raportów dotyczących badań pojemności i efektywności składowania CO₂. Interesujące byłoby odniesienie do wyników modelowania pojemności składowania i efektywności składowania wykonanych dla utworów jury dolnej antykliny Suliszewa (Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej struktur Choszczna i Suliszewa Stanisław Nagy, Jakub Siemek, Łukasz Klimowski, 2013),
- Czy na podstawie wykonanych w pracy analiz będzie możliwe ekstrapolowanie wyników i przewidywanie efektywności składowania CO₂ w utworach formacji komorowskiej i jej ekwiwalentów w niecce brzeźnej, niecce szczecińskiej oraz na wale kujawskim?

W pracy pomimo jej starannej edycji stwierdzono drobne błędy redakcyjne, które należałoby skorygować w przypadku wydania pracy drukiem:

- poprawić błędy gramatyczne np. błędne formy gramatyczne, brakujące zaimki lub przyimki,

- zweryfikować stosowane nazewnictwo, np. mineralizacja i zasolenie wód używane wymiennie,
- zweryfikować/uproszczyć niektóre podpisy pod rysunkami np. rys. 4.18,
- zweryfikować objaśnienia do wzorów,
- ujednoczyć stosowane jednostki miar, które należy np. raz mineralizacja wód jest podana w kg/m^3 , w innym miejscu g/dm^3 ,
- brakuje spisu oznaczeń, który przy dużej liczbie wzorów może być użyteczny dla czytelnika.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podjęcie realizacji tematu badawczego i założenia rozprawy doktorskiej uważam za celowe, prawidłowo uzasadnione i mieszczące się w dyscyplinie „Górnictwo i geologia inżynierska”.

Przedstawiona do oceny rozprawa dowodzi, że Doktorantka opanowała warsztat pracy badawczej i dysponuje wiedzą z zakresu uprawianej dyscypliny. Potrafi samodzielnie formułować problemy naukowe oraz prowadzić badania, wraz z ich analizą i prezentacją wyników.

Uwzględniając powyższe, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Luboń pt.: „Ocena efektywności geologicznego składowania CO_2 w poziomach wodonośnych jury dolnej Niżu Polskiego” przygotowana pod opieką dr hab. inż. Radosława Tarkowskiego, prof. IGSMiE PAN (promotor) oraz dr inż. Bartosza Papiernika (promotor pomocniczy) spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.).

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy przez Radę Naukową Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN i dopuszczenie mgr inż. Katarzyny Luboń do publicznej obrony.

