

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny LUBOŃ pt.:
**„Ocena efektywności geologicznego składowania CO₂ w poziomach wodonośnych
jury dolnej Nizy Polskiego”**

Praca doktorska Pani mgr inż. Katarzyny LUBOŃ jest dogłębnym studium porównawczym metod szacowania i obliczania pojemności i efektywności sekwestracji CO₂ w poziomach wodonośnych. Opiera się ono na analizie używanych w świecie metod analitycznych oraz interpretacji oryginalnych wyników modelowania złożowego, wykonanego dla przykładowych struktur zbiornikowych.

Uwagi wstępne

Autorka podjęła interesujący i ważny zarówno z punktu widzenia naukowego i gospodarczego temat metodyki obliczania pojemności struktur wodonośnych dla składowania CO₂, w celu ograniczenia antropogenicznych emisji tego gazu do atmosfery.

Studium literaturowe, obejmujące pracę van der Meera (1995), poprzez klasyczne już prace Bachu i Adamsa (2003), Bachu (2008, 2013), sięgające artykułów nowszych (np. Agada et al., 2017), poparte analizą krajowych publikacji naukowych (np.: Tarkowski 2005, 2008; Uliasz-Misiak 2008) oraz opracowań archiwalnych, a zwłaszcza „Rozpoznania formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂...” (2013), pozwoliło na sformułowanie złożonej tezy niniejszej pracy:

- Identyfikacja potencjalnych struktur do podziemnego składowania CO₂ oraz rozwój metodyki oszacowania ich pojemności są zasadniczymi elementami określającymi skuteczność zastosowania technologii CCS.
- Jednym z czynników decydujących o przydatności struktury geologicznej do podziemnego składowania CO₂ jest jej pojemność, czyli ilość tego gazu, jaka może być do niej zatłoczona.
- Rozbieżności w ocenach pojemności składowania CO₂ wynikają z przyjmowania różnych założeń oraz wiarygodności uwzględnionych parametrów, w tym, różnie definiowanego, współczynnika efektywności składowania.
- Efektywność składowania w rozpatrywanych poziomach wodonośnych jest zależna od usytuowania otworu iniekcyjnego i dopuszczalnego, związanego z zatłaczaniem CO₂, wzrostu ciśnienia w strukturze

Za cele pracy Autorka przyjęła: ocenę wpływu zróżnicowania czynników geologiczno-złożowych na efektywność składowania CO₂ w wybranych strukturach wodonośnych oraz porównanie pojemności składowania i współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla, określonych na podstawie badań modelowych z rezultatami obliczeń analitycznych.

Dla weryfikacji tezy i realizacji celów pracy Autorka wykorzystwała logicznie i konsekwentnie zaplanowany zestaw działań badawczych.

Na podstawie posiadanych danych geologicznych wykonała przestrzenne modele trzech struktur wodonośnych: Konary, Sierpc oraz Suliszewo. Następnie, dla każdej z nich przeprowadziła obliczenia teoretycznej pojemności składowania CO₂, korzystając z czterech metod szacowania: US DOE, CSLF, USGS oraz CGSS. W dalszej kolejności, dla każdej ze struktur, wykonała modelowanie zatłaczania CO₂ w dwu etapach (1 roku i 30 lat), w 50 lokalizacjach otworu iniekcyjnego, dla założonych ograniczeń związanych z odpowiednimi wartościami ciśnień szczelinowania formacji wodonośnej i ciśnień kapilarnych w skałach uszczelniających. Dzięki symulacjom numerycznym obliczyła dynamiczną pojemność

składowania dla analizowanych struktur oraz zidentyfikowała zjawiska odpowiedzialne za przemieszczanie się zatłaczanego gazu oraz jego pułapkowanie (w tym w postaci rezydualnej i w roztworze). Proporcje tak wyznaczonych wartości dynamicznej pojemności składowania do całkowitej teoretycznej pojemności składowania CO₂ zostały następnie obliczone i określone jako współczynniki efektywności składowania. Proporcje te porównano z odpowiadającymi im współczynnikami uwzględnianymi w metodach analitycznych US DOE, CSLF, USGS oraz CGSS, i na tej podstawie zaproponowano uzupełnienie tych ostatnich o nowe parametry pozwalające na zwiększenie dokładności oszacowań.

Układ recenzowanej rozprawy

Dysertacja liczy 196 stron i zawiera 54 rysunki oraz 39 tabel, z czego 19 w załącznikach. Zamieszczona na końcu pracy bibliografia obejmuje 143 elementy, z czego 80 to literatura zagraniczna. Kilka pozycji literaturowych stanowią niepublikowane opracowania branżowe o charakterze studialnym i projektowym oraz dane archiwalne. Pani mgr inż. Katarzyna Luboń nie zacytowała związanych z tematyką swego doktoratu publikacji, których jest współautorką lub autorką np.: *Luboń T., 2016, The effect of providing details to the model of a geological structure on the assessment of CO₂ storage capacity. Geol, Geoph. & Env. 42 (4): 449–458.*

Pracę rozpoczyna wstęp, a dalsza treść została podzielona na 7 rozdziałów:

- W części wprowadzającej Autorka uzasadnia podjęcie tematu i przedstawia znaczenie właściwego oszacowania pojemności składowania dwutlenku węgla oraz charakteryzuje czynniki geologiczne i złożowe, które należy wziąć pod uwagę dla określenia współczynnika efektywności składowania. Dalej, przedstawia tezę dotyczącą zależności pomiędzy efektywnością składowania CO₂ w poziomach wodonośnych a położeniem otworu iniekcyjnego oraz dopuszczalnym wzrostem ciśnienia w strukturze repozytorium na skutek zatłaczania. W oparciu o nią formułuje następnie zasadnicze cele pracy. Pierwszy z nich dotyczy oceny wpływu zmian wymienionych powyżej czynników na efektywność składowania CO₂ na przykładach wybranych struktur z basenu sedimentacyjnego jury dolnej Niżu Polskiego, przy wykorzystaniu modelowania złożowego. Drugi z kolei, obejmuje porównanie wyników przeprowadzonych symulacji z rezultatami obliczeń uzyskanych metodami analitycznymi.
- Rozdział 1 obejmuje krótki przegląd najważniejszych instalacji podziemnego składowania CO₂, charakterystykę podstawowych właściwości tego gazu, oraz opisy: struktur geologicznych uważanych za potencjalne repozytoria i mechanizmów pułapkowania dwutlenku węgla w głębokich poziomach wodonośnych.
- W rozdziale 2, przedstawiono podejście do problematyki pojemności i efektywności podziemnego składowania CO₂ w głębokich poziomach wodonośnych, z uwzględnieniem zagadnień techniczno-ekonomicznych oraz przestrzennej skali takich operacji. Scharakteryzowano założenia 5 metod szacowania pojemności składowania CO₂ w formacjach wodonośnych. Osobno omówiona została pojemność składowania CO₂ w postaci rozpuszczonej oraz idea dynamicznej pojemności składowania CO₂. Szerzej opisano pojęcie efektywności składowania, a następnie przedyskutowano warunkujące ją czynniki geologiczno-złożowe i technologiczne.
- Rozdział 3 zawiera uzasadnienie wyboru oraz opis budowy geologicznej i charakterystykę parametrów złożowych struktur Konary, Sierpc oraz Suliszewo, których pojemność składowania analizowana jest dalej w recenzowanej pracy.
- Rozdział 4 rozpoczyna zasadniczą część dysertacji, poświęconą obliczeniom i symulacjom wykonanym przez Autorkę. Jego treść stanowi **określenie teoretycznej pojemności składowania rozważanych struktur metodami US DOE, CSLF, USGS oraz CGSS**. W rozdziale tym przedstawiono też podstawy wykorzystanych dalej obliczeń dopuszczalnego wzrostu ciśnienia na skutek zatłaczania CO₂, tak aby nie przekroczyć wartości ciśnienia szczelinowania oraz ciśnienia kapilarnego w nadkładzie struktury.
- W rozdziale 5 Autorka przedstawia obliczenia współczynnika efektywności składowania, czyli proporcji pomiędzy dynamiczną pojemnością składowania a całkowitą teoretyczną

pojemnością składowania CO₂. Przedstawia także przyczyny jego zróżnicowania pomiędzy analizowanymi strukturami oraz uzasadnia swą propozycję rozszerzenia zmiennych uwzględnianych przy kalkulacji współczynnika efektywności składowania o trzy dodatkowe parametry.

- Kolejny rozdział – 6 – na tle rezultatów uzyskanych przez innych autorów Doktorantka przekonuje tutaj o słuszności wyboru własnych metod badawczych i obliczeniowych oraz przeprowadza częściowe porównanie wyników.
- Rozdział 7 obejmuje podsumowanie pracy oraz zestawienie wniosków, sformułowanych na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych i obliczeń.

Praca przedstawiona przez Panią mgr inż. Katarzynę Luboń ma odpowiedni układ i jest napisana w sposób zrozumiały, z zastosowaniem dobrze użytej terminologii specjalistycznej. Prawidłowo opracowana jest też warstwa ilustracyjna pracy, na którą składają się m.in. diagramy, schematy, blokdiagramy, przekroje oraz mapy.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W analizowanej rozprawie nie dopatrzyłem się błędów lub uchybień natury merytorycznej czy formalnej, które znacząco wpływałyby na jej ostateczną ocenę. Poniżej, w kolejności zgodnej z tekstem, zamieściłem spostrzeżenia i komentarze oraz sformułowałem nieliczne wątpliwości dotyczące fragmentów pracy. Niektóre z uwag są szczegółowe i mogą być przydatne przy przygotowywaniu tekstu do publikacji.

- Strona 4 – we Wstępie wyrażono zdanie mówiące, że identyfikacja potencjalnych struktur do podziemnego składowania CO₂ i rozwój metodyki oszacowania ich pojemności są zasadniczymi elementami określającymi skuteczność jej zastosowania CCS. Trudno zgodzić się z takim stanowiskiem, gdyż skuteczność CCS zależy też, a może nawet przede wszystkim, od innych czynników o charakterze technicznym, związanych z technologią wychwyty oraz transportu, a następnie zatłaczania.
- Strona 4 – W odniesieniu do pojemności składowania pojawia się sformułowanie „...ilość tego gazu, jaka może być zatłoczona do danej struktury...” Zarówno w tym miejscu jak i w niektórych dalszych fragmentach pracy należałoby określić czy chodzi tu o masę czy objętość w danych warunkach. Najczęściej operuje się pojęciem masy, np. wg Bachu i Adamsa (2003), jest to masa CO₂ względem jednostkowej objętości wody złożowej lub masa CO₂ względem jednostkowej objętości skały. *Bachu, S., Adams, J.J., 2003. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution. Energy Convers. Manag. 44 (20), 3151–3175.*
- Strona 5 – Stwierdzono, że „...celem pracy była ocena wpływu zmian wskazanych czynników geologiczno-złożowych na efektywność składowania CO₂ ...”. Chodzi tu jednak nie o ocenę wpływu zmian, a o ocenę wpływu zróżnicowania (przestrzennego) tych czynników. Zmiana odnosi się raczej do przekształcenia odbywającego się w określonym czasie.
- Strona 5 – znalazło się tu stwierdzenie, że założenia pracy jak i jej cel miały charakter nowatorski. Może należałoby dodać, że nowatorski w skali kraju. Warto w tym miejscu przypomnieć, że zarówno modelowanie numeryczne jak i rozwiązania analityczne są powszechnie stosowane w pracach związanych ze składowaniem nie tylko CO₂ ale także i innych gazów i substancji w górotworze.
- Strona 5 – Autorka pisze, iż „wyniki prac przedstawiono w siedmiu zasadniczych rozdziałach...”, podczas gdy w rzeczywistości mieszczą się one w rozdziałach od 3 do 7.
- Strona 13 – Teza mówiąca o tym, że „...im większa jest objętość skał, do których przemieścił się CO₂, tym więcej gazu zostanie rezydualnie związane.” jest zbyt ogólnym uogólnieniem, gdyż zjawisko to zwane „residual trapping” zależy także m.in. od charakterystyki przestrzeni porowej (średnice i kształt porów) oraz od nasycenia skały płynami porowymi i od ich chemizmu. Nota bene wydaje się, że odrębne wyróżnianie rozpuszczania gazu w wodzie podziemnej oraz rozpuszczania w wodach porowych nie jest

celowe, gdyż z hydrogeologicznego punktu widzenia, w porowatych poziomach wodonośnych są to te same wody.

- Strona 13 – Ilość rozpuszczonego CO₂ i prędkość rozpuszczania w wodzie złożowej zależy nie tylko od jej chemizmu, czasu i kontaktu CO₂ z nienasyconą wodą ale także od temperatury środowiska i ciśnienia gazu.
- Strona 14 – Analizując rys 1.5, ukazujący rolę różnych form pułapkowania w czasie, oraz opierając się na opisanych w literaturze rezultatach badań modelowych trudno zaakceptować stwierdzenie, że „...pułapkowanie przez rozpuszczanie w większości przypadków będzie obejmowało tylko niewielką ilość składowanego CO₂...”, a „...rezydualne oraz mineralne pułapkowanie nie wniesie wielkiego wkładu w pojemność składowania...”. Zdanie to jest prawdziwe tylko dla początkowego okresu etapu składowania, gdzie dominuje pułapkowanie strukturalne i hydrodynamiczne.
- Strona 15 – Jest to być może oczywiste, ale zwłaszcza w pierwszych rozdziałach recenzowanej pracy należy podkreślić, że we wszystkich prezentowanych wywodach dotyczących pojemności składowania chodzi o porowatość efektywną skał.
- Strona 16 – Cytowana w pracy koncepcja piramidy obrazuje raczej różne poziomy dokładności oszacowania, a nie „...różne poziomy szacowanych powierzchni”.
- Strona 19 – Na początku rozdziału 2.2. znalazło się niepotrzebne powtórzenie ze Wstępu.
- Strona 20 – Dlaczego we wzorze (2) - efektywna pojemność składowania wg US DOE – znalazł się parametr A (powierzchnia struktury), podczas gdy w oryginale publikacji Sopher i in. (2014), skąd zaczerpnięto tę formułę, zawierającą całkę powierzchniową, nie ma tego parametru.
- Strona 22 – Przy opisie parametru *Swirr* zamieszczono wyjaśnienie, że jest to „nieredukowalne nasycenie wodą. Przy redagowaniu pracy do druku proponuję zastosować częściej stosowany termin: „nasycenie wodą nieredukowalną”;
Wydaje się, że z punktu widzenia technicznego operacji zatłaczania parametr *Pf* – jest to raczej ciśnienie w dnie odwiertu (BHP - bottomhole pressure), które nie może osiągnąć ciśnienia szczelinowania
- Strona 24 – zamiast określenia „najwyższe wartości zatłaczania” należałoby może użyć sformułowania „najwyższa zatłaczalność”, co odpowiada stosowanemu w literaturze „injectivity”
- Strona 26 – Przy objaśnieniu Pojemności składowania *M_{CGSS}* – omyłkowo napisano, że jest obliczana metodą USGS,
- Strona 26 – Opisując współczynnik efektywności *E_{CGSS}* napisano, że uwzględnia on założenie, iż CO₂ wypełni jedynie 15 m miąższości warstwy wodonośnej. Należy jednak mieć na uwadze, że wartość 15 m jest oszacowana dla warunków lokalnych, opisanych w pracy Popovej i in. (2012) i niekoniecznie powinna być adaptowana dla obliczeń w innych strukturach (tak jak to uczyniono dla struktur analizowanych w pracy). Jest to uzależnione od geometrii pułapek i wartość ta będzie różna dla np. struktur typu kopuł i dla brachyantyklin.
- Strona 27 – Użyto niezręcznej konstrukcji stylistycznej; to nie ciśnienie kapilarne może spowodować wyciek przez nadkład, ale raczej to po przekroczeniu ciśnienia kapilarnego może dojść do ucieczki CO₂ z analizowanej struktury.
- Strona 28 – Pułapkowanie przez rozpuszczanie nie jest procesem stałym (kalka językowa), lecz ciągłym;
- Strona 28 – Proces nasycania wody złożowej gazem trwa od momentu wystąpienia kontaktu pomiędzy nimi i może trwać także podczas migracji CO₂.
- Strona 29 – Wzór (14) - w oryginale - Bachu i in. 2007 - brak współczynników A oraz h. (Uwaga podobna jak do wzoru (2)).
 - zamiast „proces integracji objętościowej” powinno być „całkowanie po objętości”.
- Strona 30 – Powołując się na prace Van der Meer i Egberts (2008) i van der Meer i Yavuz (2009) Autorka stwierdza, że „...czynność zatłaczania CO₂ do warstwy wodonośnej może ograniczyć jej pojemność:. W rzeczywistości, jak opisano to w cytowanych publikacjach,

rzecz polega na tym, że wprowadzenie ograniczeń ciśnienia składowania może pomniejszyć pojemność efektywną w stosunku do teoretycznie obliczonej.

- **Strona 35** – Tekst dotyczący współczynników efektywności składowania jest niespójny, co częściowo wynika z braku wyjaśnienia znaczenia parametru P - trap to aquifer volume ratio. Występuje tu prawdopodobnie kolizja oznaczeń "P", gdyż dalej mowa jest o P_{10} przedziału ufności. Czyżby P_{10} miałyby oznaczać 10% przedział? W tym przypadku 10% byłaby to wartość znikomo mała.
- **Strona 38** – termin „fingering” można tłumaczyć np. jako "powstawanie języków lepkościowych"
- **Strona 49** – Dla antykliny (poduszki solnej) Konar podano wartości ciśnienia złożowego na poziomie (9,12 – 9,94 MPa). Wydają się one zbyt niskie przy podanym gradiencie ciśnienia -1040 hPa/10m i głębokości stropu struktury: 1077 – 1832 m.
- **Strona 60** – Wyjaśnienia wymaga sposób obliczania objętości struktur zbiornikowych. Czy wyliczono ją na podstawie skonstruowanych modeli przestrzennych?
- **Strona 61** – Zestawienie na jednym wykresie profili przepuszczalności skał dla różnych struktur, i o różnych długościach i głębokościach końcowych, jest dość niefortunne, gdyż sugeruje iż profile te są ze sobą w jakiś sposób skorelowane.
- **Strona 72** – Autorka stwierdza, że w pracy nie uwzględniła pułapkowania mineralnego ze względu na jego złożoną naturę oraz fakt, że odpowiada ono za niewielką część składowanego CO_2 . Należy w tym miejscu jeszcze raz zaznaczyć, że ma ono małe znaczenie tylko w początkowym okresie składowania. Następnie jego udział wzrasta. Poza tym to najbezpieczniejszy - najtrwalszy mechanizm pułapkowania.
- **Strona 72** – Dla określenia teoretycznej pojemności składowania każdej z rozważanych struktur nasycenie wodą nieredukowalną założono na poziomie 0,3. Z pozoru wydaje się, że jest to wygodne z punktu widzenia porównań pojemności pomiędzy strukturami ale biorąc pod uwagę zróżnicowane przepuszczalności, np. dla struktury Sierpc od 2,38 mD - interwał 6, do 89,51 mD - interwał 8, można spodziewać się, że charakterystyki geometrii przestrzeni porowej będą różne (niezależnie od zwilżalności skał), a co za tym idzie także nasycenie wodą nieredukowalną będzie silnie zróżnicowane w poszczególnych wydzielonych warstwach i strukturach.
- **Strona 73** – Dla określenia pojemności składowania CO_2 w postaci rozpuszczonej Autorka przyjęła, że rozpuszczanie dwutlenku węgla w solance powoduje wzrost jej gęstości o 2,5%. Należałoby wyjaśnić jaka jest podstawa dla takiego założenia. Czy wynika to z obliczeń gęstości wykonanych dla określonego składu solanki i nasycenia CO_2 wykazanego w symulacjach? Jaki był zakładany skład solanki? Czy obliczano gęstość dla solanki typu Cl-Na (jak można to uczynić na podstawie obliczeń możliwych do wykonania na kalkulatorach równowag fazowych bazujących na np.: Duan ZH. and Sun R. (2003) *An improved model calculating CO_2 solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000 bar. Chem Geol. 193(3-4), 257-271.* Czy uwzględniano obecność wód typu Cl-Ca, które są typowe dla głębokich struktur wodonośnych?
- **Strona 80** – Niewłaściwe cytowanie źródła: wzory (20) i (21) nie pochodzą z pracy Woźniaka i Zawiszy(2011), lecz z prac Economidesa.
- **Strona 82** – błąd literowy dotyczący wielkości jednostki – jest $N \cdot m^{-1}$, ma być: $mN \cdot m^{-1}$;
- **Strona 90** – na rys. 4.5. A i B, po okresie 30 lat iniekcji widoczny jest gwałtowny spadek ciśnień do wartości niższej niż początkowa. Przydatne byłoby wyjaśnienie, jakie zjawisko za to odpowiada i jak należałoby wytłumaczyć częściową odbudowę ciśnień w okresie kolejnych kilkudziesięciu lat.
- **Strona 99** – Dla struktury Sierpc i Suliszewo stwierdzono, że zwłaszcza w strefie przyotworowej, w symulowanym czasie 1000 lat po zakończeniu zatłaczania odnotowano spadek ilości rozpuszczonego dwutlenku węgla w wodzie złożowej. Czy analizując ten fenomen wzięto pod uwagę jego potencjalny związek z migracją gęstościową (density driven flow) silniej zmineralizowanej wody złożowej w kierunku spągu struktury i ascenzji wód o niższej mineralizacji, a równocześnie o niższym udziale rozpuszczonego CO_2 ?

- **Strona 109** – na rys. 4.15. A i B, po pierwszym roku iniekcji widoczny jest silny spadek ciśnień do wartości bliskiej początkowej. Można byłoby wyjaśnić dlaczego tak się dzieje, skoro w pierwszym roku, do otworu o współrzędnych (1840; 4300) wprowadzono w pierwszym roku $1,7 \cdot 10^6$ t CO₂, a w kolejnych latach średnio około dwukrotnie więcej – $1.1009 \cdot 10^8$ t CO₂ w ciągu 30 lat.
- W rozdziale 5.3 Autorka dokonała porównania współczynnika efektywności składowania CO₂ dla rozważanych struktur i zaproponowała dodatkowe trzy zmienne (str. 130), wpływające na tenże współczynnik (wg metody US DOE). Uwzględniają one położenie otworu iniekcyjnego, wzrost ciśnienia w stropie strefy przyotworowej i w części apikalnej struktury oraz obecność uskoku w sąsiedztwie struktury. Metoda US DOE, podobnie jak i pozostałe, analizowane w pracy metody analityczne są opracowane dla dokonywania wstępnych, uproszczonych estymacji, i jako takie opierają się najczęściej na danych archiwalnych. Należałoby się zastanowić, czy wprowadzanie dodatkowych zmiennych, zwłaszcza takich, których wartości wynikają ze skomplikowanych przecież symulacji numerycznych, nie byłoby zaprzeczeniem filozofii stojącej u podstaw metod prostych oszacowań. Dylemat ten jest także udziałem Autorki, która próbuje go w jednoznaczny sposób rozwiązać przy okazji Dyskusji wyników (rozdz. 6, str. 133). Stwierdza Ona bowiem, że otrzymana różnymi metodami (analitycznymi) efektywna pojemność składowania dwutlenku węgla dla rozpatrywanych struktur jest zróżnicowana, co wskazuje na celowość wyznaczenia rzeczywistego współczynnika efektywności składowania i co jest możliwe dopiero na podstawie symulacji komputerowej.
- Mimo bardzo interesujących rezultatów pracy, niektóre z wniosków zostały sformułowane niefortunnie i zbyt ogólnie. Na przykład z wniosku pierwszego wynika tylko tyle, że największą pojemność składowania CO₂ ma ta ze struktur (Suliszewo), w której napotkano najbardziej odpowiednie warunki złożowe.
- Kolejny wniosek jest swoistą tautologią, mówi on, że szczególną uwagę należy zwrócić na wzrost ciśnienia w stropie tak, aby nie przekroczył on dopuszczalnej wartości minimalnego ciśnienia kapilarnego. Przecież było to jednym z podstawowych założeń w symulacjach wykonanych na potrzeby pracy.
- Wniosek dotyczący efektów składowania po zwiększeniu liczby otworów zatłaczających jest spekulatywny i nie wynika bezpośrednio z przeprowadzonych symulacji.
- Wniosek ostatni, mówiący o tym, że w ocenach efektywności składowania CO₂ należy określić odpowiedni obszar warstwy wodonośnej i czas, w jakim będzie odbywało się zatłaczanie dwutlenku węgla, ma raczej charakter zalecenia, które nie tyle wynika z przeprowadzonej pracy, ile raczej stanowiło jedno z jej założeń metodycznych.

Uwaga dotycząca przygotowania pracy do druku: należy zweryfikować dane dotyczące teoretycznej pojemności składowania dla struktury Konary i Sierpc, zamieszczone odpowiednio w załącznikach 5 i 9.

W swojej dysertacji Autorka skupiła się na obliczeniach tzw. dynamicznej pojemności składowania, pomijając aspekty sekwestracji mineralnej. Niezaprzeczalnie tempo procesów powstawania węglanowych minerałów wtórnych nie pozwala na pułapkowanie znacznych ilości CO₂ w początkowym okresie składowania. Mimo to, rozkład minerałów pierwotnych matrycy skalnej i krystalizacja minerałów wtórnych, już na tym etapie, mogą powodować zauważalne zmiany w porowatości i przepuszczalności skał zbiornikowych. Ich skutkiem, w zależności od warunków lokalnych, może być uszkodzenie przepuszczalności albo poprawa właściwości filtracyjnych skał, co pozostaje w bezpośrednim związku z możliwością zatłaczania do formacji oraz bezpieczeństwem składowania i integralnością repozytorium.

Istnienie tych zjawisk jest być może oczywiste, nie mniej jednak szkoda, że Autorka nie w pełni skorzystała z możliwości podjęcia dyskusji dotyczącej chociażby potencjalnych mineralogicznych i petrofizycznych skutków oddziaływania iniekcji gazu na skały analizowanych poziomów wodonośnych.

Najbardziej istotne walory rozprawy mają charakter metodyczny i wynikają głównie z rezultatów uzyskanych w trakcie badań modelowych. Polegają one na wykazaniu znaczenia optymalizacji usytuowania otworu iniekcyjnego dla uzyskania najwyższej pojemności składowania CO₂ w strukturze wodonośnej i uwypukleniu roli dopuszczalnego wzrostu ciśnienia w stropie struktury stanowiącej repozytorium gazu, nie przekraczającego ciśnienia kapilarnego w warstwie uszczelniającej. Warte zaznaczenia jest także aspekt poznawczy pracy, mający też potencjalne znaczenie w technologii składowania, a polegający na ocenie wartości współczynnika efektywności składowania dwutlenku węgla dla analizowanych struktur wodonośnych.

Zarówno dobór danych geologicznych, jak i właściwie zaplanowane i przeprowadzone prace badawcze potwierdzają, że Autorka w przemyślany i dojrzały sposób rozwiązała postawione przed sobą zadanie naukowe.

Symulacje złożowe zostały szczegółowo zaprojektowane i rzetelnie przeprowadzone, a wnioski wyciągnięte na ich podstawie dobrze ugruntowane. Świadczy to o znacznych umiejętnościach Autorki w tej dziedzinie.

Godna podkreślenia jest umiejętność właściwego zestawienia obliczeń analitycznych do porównania z wynikami oryginalnie zaplanowanych badań modelowych w taki sposób, aby umożliwiły one uzyskanie wiedzy na temat roli poszczególnych parametrów geologiczno-złożowych w kształtowaniu pojemności składowania.

Problematyka sekwestracji CO₂ i obliczania pojemności oraz potencjału składowania jest przedmiotem intensywnych prac, prowadzonych od lat 90-tych XX w. Mimo to stwierdzić należy, że praca Pani mgr inż. Katarzyny LUBOŃ jest nowatorska, zwłaszcza w skali kraju, gdyż zagadnienia o podobnej tematyce porównawczej, uwzględniające symulacje numeryczne i akcentujące znaczenie lokalizacji otworów iniekcyjnych, nie były dotąd rozwiązywane w sposób tak kompleksowy i dogłębny.

W podsumowaniu pragnę podkreślić, że recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. **Katarzyny LUBOŃ** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i posiada znaczną wartość merytoryczną. Autorka dowiodła umiejętności gromadzenia i selekcji danych, analizowania faktów, planowania i przeprowadzania symulacji numerycznych a także krytycznej i wnikliwej interpretacji ich rezultatów, w celu **oceny efektywności geologicznego składowania CO₂ w poziomach wodonośnych jury dolnej Niżu Polskiego**. Wszystko to potwierdza, iż Doktorantka prezentuje znaczną wiedzę teoretyczną oraz posiadała umiejętności samodzielnego organizowania i prowadzenia badań naukowych.

Konkluzja

Recenzowana praca doktorska pt.: „Ocena efektywności geologicznego składowania CO₂ w poziomach wodonośnych jury dolnej Niżu Polskiego” spełnia wszystkie warunki stawiane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z 2003 r.) z późniejszymi zmianami. Wobec powyższego stawiam wniosek do Komisji Doktorskiej i Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN o dopuszczenie Pani mgr inż. Katarzyny Luboń do dalszego toku przewodu doktorskiego. Ponadto mając na względzie wysoki poziom merytoryczny oraz znaczną oryginalność pracy wnioskuję o jej wyróżnienie.