

Dr hab. inż. Adam Szurlej, prof. AGH
Katedra Inżynierii Gazowniczej
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: szua@agh.edu.pl

Kraków, 25 czerwca 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Urycha

pt.: *Badania modelowe składowania ditlenku węgla w głębokich poziomach solankowych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji*

1. Podstawa formalna recenzji

Przedmiotową recenzję opracowałem jako recenzent wyznaczony przez Radę Naukową Głównego Instytutu Górniczo-Państwowego Instytutu Badawczego, na podstawie pisma z dnia 14 maja 2025 r. (znak pisma: NOP.60000.15.2025.RN) mgr inż. Jarosława Zagórowskiego Dyrektora Głównego Instytutu Górniczo – Państwowego Instytutu Badawczego w Katowicach. Przedmiotem recenzji jest załączona do ww. pisma rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Urycha pt.: *Badania modelowe składowania ditlenku węgla w głębokich poziomach solankowych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji*, zrealizowana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Adama Smolińskiego i promotora pomocniczego dr inż. Jarosława Chećko.

2. Wybór tematu i ogólna charakterystyka pracy

Ubiegły rok był rekordowy pod względem wzrostu stężenia ditlenku węgla w atmosferze. Obserwatorium Mauna Loa na Hawajach, które od 1958 r. zajmuje się monitoringiem poziomu CO₂, odnotowało wzrost stężenia o 3,58 ppm w ciągu jednego roku. Warto podkreślić, że to najwyższy wzrost w historii pomiarów i istotnie odbiegający od celu zawartego w Porozumieniu Paryskim z 2015 r. Emisja CO₂ osiągnęła 429,6 ppm (maj 2025 r.), jest to najwyższy poziom od ponad 2 milionów lat. Prognozuje się, że w 2025 r. średnie roczne stężenie CO₂ wzrośnie do 426,6 ppm, a więc nastąpi wzrost o około 2,26 ppm w porównaniu do 2024 r. Dla ograniczenia globalnego ocieplenia do 1,5°C, a więc poziomu określonego w porozumieniu paryskim, akumulacja CO₂ i innych gazów cieplarnianych w atmosferze musi zostać ograniczona, tak aby trend wzrostowy uległ odwróceniu. Wyniki badań IPCC wskazują, że niezbędne jest spowolnienie obecnego przyrostu CO₂ w atmosferze do około 1,8 ppm rocznie.

W kontekście ograniczenia emisji CO₂ w atmosferze warto przywołać zobowiązanie Unii Europejskiej do osiągnięcia neutralności klimatycznej w perspektywie do 2050 r., a także podejmowanie działań związane z wdrażaniem kompleksowych ram polityki nakierowanych na osiągnięcie celu ograniczenia emisji netto do 2030 r. o co najmniej 55%. Zgodnie z zaleceniem Komisji Europejskiej z lutego 2024 r., UE powinna ograniczyć emisję gazów

cieplarnianych do 2040 r. o 90% (w porównaniu z poziomami z 1990 r.), co będzie bardzo ważnym krokiem w kierunku osiągnięcia zerowych emisji netto do 2050 r.

Strategia UE na rzecz przemysłowego zarządzania emisjami CO₂ (ang. *Industrial Carbon Management*) koncentruje się na trzech głównych ścieżkach technologicznych:

- wychwytywanie CO₂ w celu jego składowania (CCS);
- wychwytywanie CO₂ w celu jego utylizacji (CCU);
- usuwanie CO₂ z atmosfery.

Dla osiągnięcia tych ambitnych celów pomocne będą środki finansowe z Funduszu na rzecz Sprawiedliwej Transformacji, który jest kluczowym narzędziem wspierania obszarów najbardziej dotkniętych skutkami transformacji w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej oraz zapobiegania pogłębianiu się dysproporcji regionalnych.

W kontekście przywołanych powyżej celów europejskiej polityki energetycznej warto podkreślić, zarówno znaczenie, jak i aktualność problematyki podjętej przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej. Raport Wood Mackenzie (2025 r.) *5 things to look for in 2025* przewiduje, że w 2025 r. około 200 projektów osiągnie fazę ostatecznej decyzji inwestycyjnej (FID), co przekłada się na około 500 mln Mg wychwyconego CO₂. Podobne wartości podaje Międzynarodowa Agencja Energii, zakładając realizację wszystkich projektów ogłoszonych na całym świecie, które mogą zostać ukończone do 2030 r., zdolności wychwytywania wyniosłyby łącznie 435 mln Mg CO₂ i około 615 mln Mg CO₂ zdolności składowania rocznie. Jeśli te przewidywania się sprawdzą, to będzie to rekord pod względem liczby projektów uruchomionych w ciągu jednego roku. Według danych *Global CCS Institute* (GCCSI), obecnie na świecie funkcjonuje 41 komercyjnych projektów *carbon capture*, 26 obiektów w trakcie budowy i 121 projektów w zaawansowanej fazie rozwoju. Jednak większość z nich nie powstała w związku z ograniczeniem emisji CO₂ i ochroną klimatu, ale z chęcią zwiększenia wydobycia ropy naftowej (EOR). Rzeczywista liczba instalacji CCUS jest jednak dużo wyższa i w 2024 r. było ich około 200. W sektorze energetycznym technologie wychwytywania CO₂ oferują możliwość znacznego ograniczenia emisji CO₂ z elektrowni węglowych, które w 2023 r. odpowiadały za prawie 30% globalnej emisji CO₂ związanej z sektorem energetycznym. Przy około 9000 działających obecnie bloków węglowych, z których wiele ma przed sobą potencjalnie długi okres eksploatacji, CCUS może odegrać rolę w zmniejszeniu ich emisji, aby zrealizować cele klimatyczne. Powyższe dane potwierdzają, że problematyka której podjął się Doktorant jest istotna i perspektywiczna, zwłaszcza w przypadku Polski, gdzie m.in. jednostkowa emisja CO₂ z sektora wytwarzania energii elektrycznej jest jedną z najwyższych w UE i niewątpliwie rozwój technologii wychwytywania i składowania ditlenku węgla istotnie mógłby przełożyć się na obniżenie emisji gazów cieplarnianych z sektora energetycznego.

Praca będąca przedmiotem recenzji liczy łącznie 132 strony, bez uwzględnienia załączników i składa się z rozdziału wstępnego, 4. merytorycznych rozdziałów i wniosków, spisu literatury oraz spisów: symboli, skrótów, rysunków i tabel zawartych w pracy.

W zasadniczej części pracy zamieszczono 54 rysunków oraz 22 tabele. Spis literatury obejmuje blisko 300 pozycji reprezentatywnych dla tematu dysertacji, zdecydowana większość to pozycje w języku angielskim. Dominują pozycje z ostatnich lat, które są odpowiednie dla przygotowania kompleksowego przeglądu literatury przedmiotu. Warto podkreślić obecność 7 pozycji literaturowych w spisie literatury, których współautorem jest Autor rozprawy.

Struktura pracy jest poprawna. Strona formalna praktycznie nie budzi żadnych wątpliwości. Praca napisana jest odpowiednim językiem naukowo-technicznym. Autor nie ustrzegł się kilku drobnych błędów, które zostaną przybliżone w dalszej części recenzji.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej: *Badania modelowe składowania ditlenku węgla w głębokich poziomach solankowych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji* jest bardzo istotna zarówno z naukowego, jak i użytecznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę m.in. przywołane powyżej unijne cele polityki klimatycznej, jak również wysoką emisyjność krajowej gospodarki w ujęciu jednostkowym. Cele rozprawy (naukowy i użyteczny) zostały sprecyzowane w rozdziale 1. i koncentrowały się ona odpowiednio na określeniu efektywności procesu geologicznego składowania CO₂ w głębokich solankowych poziomach wodonośnych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji oraz wykazanie możliwości wykorzystania modelu zastępczego w początkowym etapie projektu CCS, co przełoży się na istotne zmniejszenie czasochłonności numerycznych symulacji geologicznego składowania CO₂.

Od pracy doktorskiej należy oczekiwać określenia problemu badawczego, sformułowania tezy bądź tez pracy. W rozdziale 1. sformułowany został precyzyjnie problem badawczy, co należy przyjąć z zadowoleniem, gdyż to sformułowanie rozpoczyna proces badawczy. Problem badawczy umożliwia sformułowanie tezy (bądź tez pracy) jednak Doktorant jej nie przywołał w sposób bezpośredni. Pozytywnie natomiast należy ocenić przedstawienie przez Doktoranta zarówno metod i narzędzi badawczych wykorzystywanych w rozprawie doktorskiej, jak i sprecyzowanie procesu badawczego w podziale na poszczególne etapy pracy.

Rozdział 2. zawiera przegląd literatury, który ma na celu zaprezentować aktualny stan wiedzy dotyczącej rozwoju technologii CCUS w ujęciu globalnym, ze szczególnym uwzględnieniem metod składowania CO₂ w strukturach geologicznych, jak i oceanach. W rozdziale tym Doktorant przybliżył także przykłady wykorzystania metod sztucznej inteligencji w obszarze technologii CCUS; przedstawił ogólną klasyfikację systemów sztucznej inteligencji, a także podstawy budowy sztucznych sieci neuronowych. Scharakteryzował także proces uczenia sztucznej sieci i wskazał, że po analizie różnych wariantów uczenia sieci ostatecznie wybrał algorytm Bayesian Regularization (*trainbr*), stanowiący modyfikację algorytmu Lavenberga-Marquardta (*trainlm*), jako algorytm do zastosowania w zbudowanym na potrzeby pracy modelu.

W rozdziale 3. Doktorant kontynuując realizację celu prac przybliżył przyjęte założenia niezbędne do budowy modelu, jak również przedstawił etapy budowy numerycznego modelu symulacyjnego. Badania Doktoranta koncentrowały się na: określeniu warunków początkowych w górotworze w obrębie potencjalnego składowiska CO₂, sprecyzowaniu głównych parametrów zatłaczania i określenie lokalizacji otworów iniekcyjnych, przeprowadzeniu szeregu symulacji procesu zatłaczania, co było niezbędne dla pozyskania informacji o wydajności zatłaczania i właściwości strumienia CO₂, a także określenie powierzchniowego i pionowego zasięgu CO₂ w zależności od m.in.: czasu i charakteru przepływu CO₂ w zbiorniku. W pracy przeanalizowana została efektywność procesu składowania w zależności od rodzaju odwiertów zatłaczających. W dalszej części rozdziału Doktorant podjął się oceny wrażliwości modelu na wybrane parametry początkowe, takiej jak: temperatura i stopień hydrodynamicznej otwartości struktury.

Mając na uwadze właściwości CO₂ i względy bezpieczeństwa, w pracy Doktorant uwzględnił przygotowanie oceny ryzyka dla modelowanego procesu – określone zostały parametry krytyczne, które mają istotny wpływ na wypadek wycieku CO₂. Doktorant przedstawił modele geologiczne trzech formacji geologicznych: górnoląskiej serii piaskowcowej, krakowskiej serii piaskowcowej i warstw dębowieckich. Doktorant nie podał jednak uzasadnienia wyboru tych formacji, spośród których górnoląska seria piaskowcowa cechuje się przepuszczalnością, która właściwie nie kwalifikuje tej lokalizacji jako potencjalnego składowiska CO₂. Analizowanie jej przydatności z góry zdaje się być bezcelowe, co potwierdziły wyniki symulacji numerycznych – warstwy dębowieckie wskazano jako najbardziej perspektywiczne dla potencjalnego składowania CO₂. Doktorant używa sformułowania: *zaprojektowałem otwór kierunkowy o długości odcinka horyzontalnego wynoszącej około 500 m oraz pojedynczy odwiert kierunkowy wellhor o długości odcinka horyzontalnego wynoszącej około 500 m oraz pojedynczy odwiert kierunkowy well (odcinek horyzontalny: około 900 m)*, łącząc pojęcia odwiertu kierunkowego i odwiertu horyzontalnego, które stanowią odrębne metody wiertnicze. Ponadto nadużyciem jest twierdzenie o zaprojektowaniu otworów – proces projektowania odwiertów wiertniczych to proces znacznie bardziej złożony niż przyjęcie głębokości odwiertu i długości odcinka horyzontalnego. Za optymalny scenariusz zatłaczania Doktorant uznał ten, w którym w okresie 25 lat objętych symulacją zatłoczono 8,54 mln Mg CO₂. Wynik taki należy uznać za niski, szczególnie w kontekście długości trwania potencjalnego projektu. Autor wskazuje na możliwość zwiększenia pojemności poprzez zwiększenie liczby odwiertów iniekcyjnych. Nie należy więc w przypadku przytoczonego scenariusza mówić o *rozwiązaniu optymalnym*. Projekty realizowane do tej pory sekwestrują ok. 1 mln Mg CO₂/rok, projekty nowe zakładają często ilości znacznie większe.

W rozdziale 4. Doktorant określił wpływ parametrów w modelu na przebieg procesu geologicznego składowania CO₂. Dokonał wyboru pięciu kluczowych parametrów w modelu (porowatość, przepuszczalność, stosunek miąższości efektywnej do całkowitej, głębokość i rezydualne nasycenie gazem), przyjął dla nich zakresy zmienności i przeprowadził symulacje numeryczne zatłaczania CO₂ uwzględniających zróżnicowane wartości wybranych parametrów. Lista parametrów (tabela 4.2) jest krótka, a znaczenie większości parametrów jest dość oczywiste. W analizie brak jest parametrów trudnych do jednoznacznego określenia na wstępnym etapie, a których wpływ może być bardzo istotny, jak np. nasycenie wodą związaną lub anizotropia przepuszczalności. Dla przeprowadzenia kompleksowej analizy wrażliwości zbudowanego modelu mgr inż. Tomasz Urych przeprowadził eksperyment symulacyjny uwzględniający sto pięćdziesiąt modeli aproksymacyjnych zawierający po trzydzieści próbek dla każdego z pięciu analizowanych parametrów w modelu. Otrzymane wyniki z analizy wrażliwości przedstawił na tzw. wykresie tornado (rys.4.11), który umożliwia w sposób graficzny oszacować wielkość wpływu zmian wartości wszystkich kluczowych parametrów przyjętych w modelu na wyniki symulacji złożowych. Wyniki badań Doktoranta wskazują, że największy wpływ na ilość ditlenku węgla możliwego do zmagazynowania ma przepuszczalność warstwy wodonośnej, zaś najmniejszy – porowatość. W kontekście tak szerokiego zakresu porowatości rozważanego w pracy dziwi fakt uplasowania się tego parametru na ostatnim miejscu pod względem wpływu na pojemność sekwestracijną.

Przeprowadzona analiza odnosi się do konkretnej struktury geologicznej. W związku z tym pojawiają się wątpliwości, czy rzeczywiście położenie głębokości stropu struktury jest aż tak

niepewne, że można spodziewać się go pomiędzy -550 m a -900 m (tabela 4.2; s.85)? Jeżeli zaś analizowana jest ogólna wrażliwość procesu, to nie należałoby się odnosić do konkretnej struktury geologicznej. Głębokości podane są, jak się wydaje, poniżej poziomu terenu bez informacji o wysokości ponad poziom terenu. W związku z tym granica -550 m rodzi pytanie o zachowanie minimalnej wymaganej głębokości struktury. Dodatkowo mając na uwadze istotny przedział zmienności głębokości należałoby rozważyć jak zmieniało się ciśnienie i temperatura górotworu w relacji do głębokości.

W rozdziale 5. Doktorant scharakteryzował poszczególne etapy związane z budową modelu zastępczego z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, z uwzględnieniem metodyki opracowania bazy danych do trenowania, walidacji i testowania sieci neuronowej, a także optymalizacji bazy danych przy wykorzystaniu metod typu Monte Carlo. W dalszej części rozdziału Doktorant przybliżył strukturę opracowanej sztucznej sieci neuronowej: dwuwarstwowa jednokierunkowa sieć neuronową (sieć typu feedforward) z warstwą ukrytą zawierającą 5 neuronów. W końcowej części rozdziału Doktorant przeprowadził testowanie zbudowanego zastępczego modelu złożowego z wartościami sumarycznej wielkości zatłaczania CO₂ do górotworu w numerycznym modelu złożowym. Wyniki przeprowadzonych testów potwierdzają wiarygodność zastępczego modelu złożowego, który został zbudowany w oparciu o sztuczną sieć neuronową. Wyniki przedstawione na rysunku 5.1 pokazują relatywnie niewielką zmienność w analizowanej przestrzeni zmienności parametrów (wykres nie posiada siatki, trudno więc odczytać przedział zmienności). Charakter wszystkich krzywych jest bardzo zbliżony. Należy zaznaczyć, iż nie podano sposobu sterowania zatłaczaniem CO₂. Dodatkowo należy podkreślić, że opracowany model nie określa zasięgu strefy nasyconej CO₂, rozkładu ciśnienia, a jedynie sumaryczną ilość zatłoczonego CO₂.

W rozdziale 6. *Wnioski* zestawiono najważniejsze wnioski, które zwieńczają rozprawę doktorską.

Pozytywnie oceniam fakt, że Doktorant podjął się realizacji złożonego i trudnego problemu, który, jak już wcześniej zasygnalizowałem, jest istotny z punktu widzenia planowanych działań w kierunku dekarbonizacji gospodarki. Zagadnienie badawcze, jak najbardziej można uznać za złożone i wielowymiarowe, a jego analiza skomplikowana i trudna głównie ze względu na nowatorski charakter rozważanego podejścia do składowania ditlenku węgla w Polsce. Doktorant musiał się zmierzyć z wieloma poważnymi problemami, m.in. selekcją i pozyskaniem odpowiednich danych wejściowych dla poszczególnych potencjalnych lokalizacji składowania CO₂, przeprowadzenie serii symulacji numerycznych, które były niezbędne dla zbudowania finalnie modelu zastępczego. Realizacja tematu pracy byłaby niemożliwa bez odpowiedniego – zaawansowanego przygotowania Doktoranta w obszarze jakże dynamicznie rozwijającym się w ciągu ostatnich lat – sztucznej inteligencji.

Podsumowując, stwierdzam, że zarówno struktura pracy, jak i sekwencja kolejnych rozdziałów oraz ich objętość została dobrane właściwie.

Za oryginalne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- zbudowanie modelu zastępczego opartego na metodach sztucznej inteligencji, który został poddany procesowi trenowania, testowania i walidacji. Było to możliwe dzięki m.in. wcześniejszemu opracowaniu odpowiednio reprezentatywnej bazy danych. Prace nad modelem zakończone sukcesem potwierdzają realizację celu i założonego problemu badawczego – Doktorant potwierdził, że zastosowanie sztucznych sieci neuronowych

w modelowaniu dynamicznym zachowania CO₂ składowanego w górotworze, przekłada się na znaczne zmniejszenie czasochłonności numerycznych symulacji geologicznego składowania CO₂. Dodatkowo opracowany w ramach niniejszej pracy model jest narzędziem, które nie wymaga znacznych mocy obliczeniowych, w tym zapewnienia dostępu do zdalnych serwerów/klastrów obliczeniowych, wykorzystywanych często w przypadku numerycznych symulacji złożowych i przetwarzania danych;

- określanie efektywności procesu geologicznego składowania CO₂ w głębokich solankowych poziomach wodonośnych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji.

4. Uwagi i kwestie dyskusyjne

Uważam, że rozprawa doktorska została napisana w sposób przejrzysty, klarowny i logiczny. Układ pracy nie budzi zastrzeżeń, a kolejność rozdziałów jest prawidłowa. Język użyty w pracy jest prawidłowy i właściwie w zaledwie kilku przypadkach wymaga drobnej korekty. Doktorant nie ustrzegł się jednak drobnych usterek o różnym charakterze, które zostały poniżej wymienione. Rozprawa doktorska została napisana w pierwszej osobie liczby pojedynczej, co nie jest rozwiązaniem standardowym dla polskiego języka naukowego. Praca dodatkowo zyskałaby na przejrzystości, jeżeli kolejne rozdziały rozpoczynałyby się od nowej strony.

Uwagi szczegółowe

1. Na s. 4 (3 wiersz od dołu) użyto wyrazu: *znaczne*, zamiast: *znacznie*.
2. Brak wstawienia przecinków (,) np. w początkowej części podrozdziału 2.1.1 na s. 18, przed: *jak i globalnych zmian*; s. 64, przed: *jak również otworu kierunkowego*.
3. Na s. 22 (ostatni wiersz) jest sformułowanie: *są zatłaczane* zamiast: *jest zatłaczany*.
4. Na s. 23 (połowa podrozdziału: 2.1.2.1.1) Autor posługuje się sformułowaniem: *kosztów inwestycyjnych*, a czy nie powinien użyć: *nakładów inwestycyjnych*?
5. Na s. 31 (przy końcu drugiego akapitu podrozdziału: 2.1.2.1.4) Doktorant dla wyrażenia jednostki masy użył *Gt*; w całej pracy operował (prawidłowo) *Mg*.
6. Na s. 36 (początek podrozdziału: 2.1.3) Autor dla określenia liczebności instalacji CCUS użył *ilość* zamiast: *liczba*.
7. Na s. 36 (pierwszy wiersz) Autor przedstawił *mapę aktualnego stanu* w odniesieniu do instalacji CCUS na świecie; określenie *aktualny* może okazać się sformułowaniem niezbyt precyzyjnym ponieważ – jak sam Autor podkreślił w pracy – w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost tych instalacji. Lepszym rozwiązaniem byłoby sformułowanie: *mapę według stanu na 2023 r.*
8. W tabeli 3.1 (s. 57) Autor używa określenia *rozdzielczość modelu* w kontekście wymiarów obszaru objętego modelowaniem.
9. Ilość CO₂ podawana w sm³ – standardem jest określanie ilości CO₂ w jednostkach masy (Mg).
10. W tabeli 3.6a (s. 65) podany jest parametr "temperatura solanki" – zakładam, że Autor ma na myśli temperaturę górotworu; jedna z temperatur (303,15 K) jest niższa niż temperatura krytyczna CO₂ i nieadekwatna do zakresu głębokości.

11. Na początku rozdziału 4. poświęconego analizie wrażliwości modelu symulacyjnego Autor użył sformułowania: *analiza niepewności*, w tym kontekście proponuję zamiennie posługiwać się: *analiza zmienności* lub *analizie wrażliwości wyników* (s. 80).
12. W tabeli 4.2 (s. 85) przyjęcie górnej granicy dla porowatości równej 50% jest nierealistyczne. Przy wartości najbardziej prawdopodobnej określonej na poziomie 15%, wartości minimalnej 10%, taka wartość górnej granicy jest nieuzasadniona.
13. Na s. 95 w komentarzu dotyczącym porowatości podano błędną wartość 9,11%, zamiast 2,05% (jak jest na rysunku 4.11).
14. W przypadku podpisów pod rys. *opracowanie własne* w przeważnie podawano to sformułowanie w nawiasach; w kilku przypadkach występuje bez nawiasów, np. rys.3.11, rys.3.12, czy 3.15; warto ujednolicić.

Reasumując, pragnę jednocześnie stwierdzić, że nie mam żadnych wątpliwości co do faktu, że Doktorant prawidłowo zrealizował zamierzone cele pracy. Recenzowaną rozprawę doktorską można potraktować jako udany eksperyment badawczym, charakteryzuje się potencjałem wdrożeniowym, a omawiany w niej problem ma ważne znaczenie gospodarcze, zwłaszcza obecnie, mając na uwadze podejmowane działania po stronie zarówno administracji rządowej, jak i czołowych przedsiębiorstw energetycznych, mających na celu realizację projektów CCUS. Tym samym chcę jednoznacznie podkreślić, że wymienione powyżej drobne uwagi nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny merytorycznej dysertacji.

Pytania do Doktoranta

Wnikliwa lektura pracy nasunęła mi następujące pytania:

1. W odniesieniu do podanych w tabeli 3.1 (s. 57) objętości porowych nie sprecyzowano, czy uwzględniono w tych wartościach nasycenie wodą związaną? Należy domniemywać, że zapewne chodzi o całkowitą objętość porową, która nie przedstawia rzetelnej informacji na temat objętości nawet teoretycznie dostępnej dla magazynowania CO₂.
2. Dlaczego promień zewnętrzny akifera w rozważanym modelu analitycznym w tabeli 3.3 (s. 62) jest zbyt mały i nie odpowiada powierzchni podanej w tej samej tabeli?
3. Na początku podrozdziału 4.2 Autor stwierdza, że Petrel umożliwia oszacowanie niepewności wyników dynamicznych symulacji złożowych. Zatem jaki parametr/parametry oszacowano? Co było miarą niepewności?
4. Jakie były powody przyjęcia początku okresu objętego symulacją na rok 2012?

Uważam, że zarówno zakres pracy, jak również sposób kompleksowego podejścia do opracowania i przedstawienia złożonego problemu zasługują na docenienie. Realizacja wyznaczonego celu pracy doktorskiej nie byłaby możliwa bez interdyscyplinarnego podejścia i wymagało od Doktoranta bardzo dobrej znajomości zagadnień z zakresu termodynamiki, inżynierii złożowej, mechaniki płynów oraz baz danych, jak również posługiwania się specjalistycznym oprogramowaniem i sztuczną inteligencją. Otrzymane wyniki pracy stanowią oryginalny dorobek naukowy Doktoranta.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest złożona i trudna, ale zarazem niezwykle istotna, mając na uwadze wypełnienie rygorystycznych celów polityki energetycznej w obszarze ograniczenia emisji CO₂. W wyniku realizacji rozprawy doktorskiej zostały przeprowadzone serie symulacji i opracowano model, który można traktować jako narzędzie wsparcia przy przygotowaniu projektów z zakresu CCUS.

Reasumując, stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Urycha, spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm). Zawiera bowiem oryginalne wyniki badań w obszarze badania efektywności procesu geologicznego składowania CO₂ w głębokich solankowych poziomach wodonośnych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji oraz dowodzi odpowiedniej wiedzy Doktoranta. Na tej podstawie wnioskuję do przez Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnictwa-Państwowego Instytutu Badawczego o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Urycha do dalszych etapów procedury nadania stopnia naukowego doktora.


Dr hab. inż. Adam Szurlej