

Gliwice, 14 maja 2025 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
wojciech.stanek@polsl.pl

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Urycha

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

Podstawą niniejszej recenzji było zlecenie Dr Jarosława Zagórowskiego, Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Katowicach. Promotorem pracy jest Prof. dr hab. inż. Adam Smoliński; promotorem pomocniczym dr inż. Jarosław Chećko.

W ramach recenzji dokonano oceny pracy doktorskiej w zakresie poprawności doboru tytułu rozprawy; układu rozprawy doktorskiej; zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej; zdefiniowanego celu pracy oraz zastosowanych metod badawczych; omówienia wyników badań; potencjału praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań; nieprawidłowości, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej. Ponadto pod uwagę brano czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Ocenę w zakresie wyżej wymienionych kryteriów przedstawiono w kolejnych punktach recenzji: 1. Tematyka pracy doktorskiej i trafność jej doboru; 2. Ogólna charakterystyka pracy; 3. Uwagi do pracy (3.1 Uwagi merytoryczne o charakterze krytycznym i dyskusyjnym; 3.2. Wybrane uwagi o charakterze redakcyjnym); 4. Wniosek końcowy.

W ramach recenzji dokonano oceny czy rozprawa (postępowanie jest prowadzone w ramach dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka) spełnia wymagania zgodne z

Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023 poz. 742 ze zm.).

1. Tematyka pracy doktorskiej i trafność jej doboru

Praca poświęcona jest badaniom w zakresie zaawansowanych analiz (z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji) dotyczących składowania dwutlenku węgla w głębokich poziomach solankowych. W ramach wstępu do pracy Autor szczegółowo definiuje problem badawczy, cel pracy oraz koncepcję badań. Autor pracy jednoznacznie podkreśla, że wyniki symulacji numerycznych, określające szacunkowe pojemności składowania CO₂ w strukturach geologicznych, stanowią kluczowy element w procesie decyzyjnym podczas wdrażania projektów CCS w skali przemysłowej. Podjęta tematyka badań jest ważna z punktu widzenia technologii CCS co gdyż (jak przedstawia w pracy Autor): „Zgodnie z Dyrektywą CCS dotyczącą geologicznego składowania dwutlenku węgla w krajach UE, wybór odpowiedniej podziemnej formacji geologicznej w celu trwałego składowania CO₂ musi być poprzedzony opracowaniem szczegółowej charakterystyki i oceną potencjalnego zbiornika składowania oraz otaczającego go górotworu. Charakterystyka dynamicznego zachowania dwutlenku węgla składowanego w górotworze stanowi istotny etap w procesie oceny potencjalnego zbiornika CO₂. Modelowanie dynamiczne obejmuje szereg symulacji procesu zatłaczania CO₂ do składowiska z wykorzystaniem trójwymiarowego statycznego modelu geologicznego górotworu. Wyniki symulacji numerycznych, określające szacunkowe pojemności składowania CO₂ w strukturach geologicznych, stanowią kluczowy element w procesie decyzyjnym podczas rozważania wdrożenia projektów CCS na skalę przemysłową. „ Przedstawione przez Autora sformułowanie jednoznacznie potwierdza ważność podjęcia badań przeprowadzanych w ramach ocenianej pracy doktorskiej.

Zakres prac badawczych szczegółowo opisanych w niniejszej pracy obejmował następujące etapy:

- bardzo szczegółowy przegląd literatury (285 pozycji) w zakresie aktualnego stanu wiedzy na temat technologii CCUS oraz rozwoju i klasyfikacji systemów sztucznej inteligencji,
- budowę zaawansowanych modeli numerycznych dla trzech wybranych obszarów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW);
- zaawansowaną analizę wrażliwości opracowanego modelu symulacyjnego z określeniem wpływu kluczowych parametrów modeli na przebieg procesu składowania CO₂;
- opracowanie modelu zastępczego opartego na sztucznych sieciach neuronowych.

W ramach ocenianej pracy Autor precyzyjnie definiuje główny problem badawczy: „Analiza możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w modelowaniu dynamicznym zachowania dwutlenku węgla składowanego w górotworze, mającego na celu znaczne zmniejszenie czasochłonności numerycznych symulacji geologicznego składowania CO₂”, który jest bardzo ważny z punktu widzenia rozwoju technologii składowania CO₂.

W. Stacef

W rozdziale 1 (Wstęp) Autor pracy przedstawia szczegółowe uzasadnienie ważności podjęcia badań w zakresie badań oraz modelowania składowania ditlenku węgla oraz przedstawia szczegółowe sformułowanie problemu badawczego oraz cel i koncepcję badań. W rozdziale 2 Autor przedstawia bardzo szczegółowo przegląd literatury (aktualny stan wiedzy) w szczególności w zakresie: 1) Rozwoju technologii wychwytu wykorzystania i składowania ditlenku węgla (CCUS) skutecznym sposobem na zmniejszenie emisji CO₂ oraz 2) Możliwości wykorzystania metod sztucznej inteligencji w obszarze technologii wychwytu, wykorzystania i składowania CO₂ (CCUS).

Badania zrealizowane w ramach pracy doktorskiej obejmują bardzo szeroki zakres, w tym: 1) budowę numerycznych modeli złożowych w poziomach solankowych; 2) analizę wrażliwości i ocena ryzyka dla modelowanego procesu; 3) analizę wrażliwości modelu symulacyjnego, w tym określenie wpływu kluczowych parametrów modelu na przebieg procesu składowania CO₂; 4) przygotowanie bazy danych do trenowania, walidacji i testowania modeli neuronowych oraz 5) opracowanie i testowanie modelu zastępczego opartego na sztucznych sieciach neuronowych.

Uważam jednoznacznie, że podjęte przez Kandydata do stopnia doktora badania w zakresie składowania CO₂ w głębokich poziomach solankowych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji są bardzo ważne z punktu widzenia dalszego rozwoju tych technologii (technologie wychwytu, wykorzystania i składowania ditlenku węgla (CCUS)) oraz zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska naturalnego. Trafność doboru tematyki niniejszej pracy doktorskiej oceniam bardzo dobrze.

Podjęcie tematu należy uznać za w pełni uzasadnione, a uzyskane wyniki są bez wątpienia oryginalne i bardzo cenne z naukowego punktu widzenia oraz zastosowań praktycznych.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Celem naukowym pracy było określenie efektywności procesu geologicznego składowania CO₂ w głębokich solankowych poziomach wodonośnych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. Celem użytkowym było wykazanie możliwości wykorzystania modelu zastępczego w początkowym etapie projektu CCS umożliwiającego znaczne zmniejszenie czasochłonności numerycznych symulacji geologicznego składowania CO₂. Jednoznacznie uważam, że podjęta tematyka badań jest bardzo ważna w punkcie widzenia aktualnych

W. Starek

problemów w zakresie dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Struktura ocenianej pracy obejmuje:

- 1) w rozdziale 1 Autor przedstawił szczegółowe wprowadzenie do rozprawy doktorskiej, sformułowanie problemu badawczego oraz cel pracy,
- 2) w rozdziale 2 Autor przedstawił bardzo szczegółowy przegląd literatury (285 pozycji) potwierdzający ważność podjęcia tematyki badawczej,
- 3) w rozdziale 3 Autor omówił szczegółowo zakres prowadzonych badań,
- 4) w rozdziale 4 Autor szczegółowo zaprezentował bazowy (referencyjny) model symulacyjny wraz z prezentacją i dyskusją uzyskanych wyników symulacji,
- 5) w rozdziale 5 Autor szczegółowo przedstawił opracowany model zastępczy oparty na sztucznych sieciach neuronowych wraz z z prezentacją i dyskusją uzyskanych wyników.
- 6) w rozdziale 6 Autor prezentuje bardzo szczegółowo wnioski uzyskane w ramach przeprowadzonych badań.

Strukturę ocenianej pracy również oceniam bardzo dobrze. Należy również podkreślić, że przeprowadzone badania w ramach realizacji pracy doktorskiej pozwoliły na sformułowanie bardzo ważnych wniosków w zakresie składowania ditlenku węgla w głębokich poziomach solankowych szczegółowo omówione przez Autora w Rozdziale 6 pracy – „Wnioski”.

3. Uwagi do pracy

3.1. Uwagi merytoryczne o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Generalnie z punktu oceny merytorycznej praca jest przygotowana bardzo dobrze. Należy jedynie wymienić drobne uwagi merytoryczne:

- 1) W ramach pracy Autor powinien przedstawić szczegółowy schemat ad. struktura sieci neuronowej stosowanej w prowadzonych analizach. W pracy jest tylko schemat ogólny.
- 2) W ramach pracy powinien być zamieszczony bardziej szczegółowy opis algorytmów stosowanych w prowadzonych analizach. Np. w odniesieniu do opisów przedstawionych w pkt. 4.1 i 4.2,
- 3) W ramach pracy Autor stosuje pojęcie (np. str. 4, 15, 26) „efektywność procesu geologicznego składowania CO₂”. W pracy powinna być zamieszczona szczegółowa definicja tej efektywności.

W. Stary

4) Na stronie 60 Autor pracy prezentuje równania (3.1–3.4) do obliczeń przepuszczalności względnej zmodyfikowane w ramach realizacji pracy. W pracy powinien być zamieszczony szczegółowy opis ad. modyfikacja wymienionych równań.

5) W pracy powinny być zamieszczone bardziej szczegółowe opisy stosowanych metod w zakresie modelowania, np. str. 56, pkt. 3.2.1 przed prezentowanym modelem „*model statyczny w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej*” powinien być szczegółowy opis modelu.

3.2. Wybrane uwagi o charakterze redakcyjnym

1) W ramach pracy Autor powinien stosować formę bezosobową, np. na str. 65 przed tab. 3.6a Autor stwierdza „*Badalem także wpływ szczelinowania hydraulicznego otworów na efektywność zatłaczania. Szczegółową charakterystykę poszczególnych wariantów zatłaczania przedstawiłem w tab. 3.6a i tab. 3.6b*”, natomiast tablice odnoszą się do wspólnej publikacji [Urych i Smoliński, 2019],

2) str. 11/12: Słaba jakość rysunków 1.1; 2.1,

3) str. 35 Rys. 2.6 czy w tytule rysunku powinien być taki szczegółowy opis „*W przypadku magazynowania oceanicznego typu „rozpuszczanie” CO₂ szybko rozpuszcza się w wodzie, a w przypadku magazynowania oceanicznego typu „jezioro” CO₂ składowany jest początkowo w postaci ciekłej na dnie morskim*” ?

4) str. 96 przed rysunkiem 5.1 Autor przedstawia informację: „*Zbiór wszystkich wyników 150 symulacji dla wybranej funkcji celu, czyli sumarycznej ilości ditlenku węgla zatłoczonego do górotworu w funkcji czasu, przedstawiłem na rys. 5.1.*” przed wykresem powinien być opis 150-ciu wariantów.

5) na niektórych rysunkach przedstawionych w ramach ocenianej pracy jest brak opisu osi, np. na rysunkach 4.10 (str. 94), 5.17 (str. 116) brak opisu lewej osi Y,

6) Str. 99 Na rys. 5.2 Autor przedstawia „*Schemat opracowanej sztucznej sieci neuronowej*” – to jest ogólny schemat, należało przedstawić schemat szczegółowy prezentujący ilość neuronów w poszczególnych warstwach opracowanej sieci SSN,

13) str. 99 Tab. 5.1 W odniesieniu pakietów danych przedstawionych w Tab. 5.1 Autor powinien przedstawić szczegółowe wyjaśnienie dotyczące - pakiet „testowanie” i „dodatkowy pakiet testujący;

14) równanie (5.1) str. 101 – Autor powinien zamieścić szczegółowe wyjaśnienie co oznacza „*wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej*”

W. Graef

4. Wniosek końcowy

W ramach recenzji dokonano oceny pracy w zakresie poprawności doboru tytułu rozprawy; układu rozprawy doktorskiej, zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej; zdefiniowanego celu pracy oraz zastosowanych metod badawczych; omówienia wyników badań; potencjału praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań; nieprawidłowości, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej. Ponadto pod uwagę brano czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Uważam, że wszystkie wymienione kryteria kandydat do stopnia doktora spełnia bardzo dobrze.**

Jestem przekonany, że oceniona praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie o stopniach i tytułach naukowych (Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023 poz. 742 ze zm.)). Praca stanowi cenny wkład w ramach metod dotyczących analiz w zakresie procesów geologicznego składowania dwutlenku węgla w głębokich poziomach solankowych. Praca zawiera jedynie drobne błędy o charakterze merytorycznym i redakcyjnym. Pracę oceniam bardzo dobrze. Należy dodać, że Kandydat jest współautorem 17 publikacji w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, w tym 7 artykułów w czasopiśmie naukowym *Energies* (IF=3).

Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Tomasza Urycha do publicznej obrony pracy doktorskiej. Uważam ponadto, że praca doktorska Pana mgr inż. Tomasza Urycha zasługuje bez wątpienia na wyróżnienie. Stawiam zatem wniosek o wyróżnienie ocenianej pracy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek
Katedra Techniki Ciepłej
Politechnika Śląska

W. Stanek