

Kraków, 17.07.2022

dr hab. inż. Anna Pajdak
Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk
ul. Reymonta 27
30-059 Kraków
pajdak@imgpan.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Dawida GAJDY na temat
„Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo – wodorowych.
Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji”

1. Wprowadzenie

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo RIE-BD.512.27.2022 z dnia 18.05.2022 r.

2. Zawartość rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Dawida Gajdy zatytułowana jest „Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo – wodorowych. Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Marcin Lutyński, prof. PŚ.

Praca liczy ogółem 163 strony, spis literatury w ilości 120 pozycji, w tym 5 pozycji których Doktorant jest autorem bądź współautorem, spis rysunków oraz załączniki. Rozprawa składa się z 9 głównych rozdziałów, zakończonych podsumowaniem i wnioskami.

W rozdziale 1, zatytułowanym *Wstęp*, Autor zaprezentował argumenty sygnalizujące potrzebę prowadzenia badań zawartych w Dysertacji. Zaprezentował On ogólny zarys koncepcji podziemnego magazynowania wodoru oraz mieszanek wodorowo-metanowych.

W rozdziale 2, zatytułowanym *Teza i zakres pracy*, Autor przedstawił cel naukowy i cele użyteczne pracy oraz sformułował tezę pracy, która brzmi: „Istnieje możliwość wytypowania powszechnie dostępnych i ekonomicznych materiałów, które mogą stanowić odpowiednie powłoki izolacyjne możliwe do aplikacji na powierzchni podziemnych magazynów mieszanek metanowo - wodorowych lub wodoru.”

W rozdziale 3, zatytułowanym *Aktualny stan wiedzy i techniki*, Autor zasygnalizował najważniejsze światowe problemy związane ze wzrastającym zapotrzebowaniem na energię oraz optymalizacją procesu produkcji energii pochodzącej z odnawialnych źródeł (OZE). Następnie Autor zaprezentował szeroki przegląd dotychczasowych rozwiązań wielkoskalowych podziemnych magazynów energii w Polsce i na świecie oraz geotechniczne aspekty wykorzystania wyrobisk podziemnych w kontekście magazynowania energii. Sporządzone zostało porównanie wybranych materiałów izolacyjnych, stosowanych w konstrukcji podziemnych magazynów

energii oraz rodzaj kosztów budowy i utrzymania takich magazynów. Opisana została metodyka określania dyfuzji oraz przytoczone zostały dotychczasowe wybrane doniesienia literaturowe na świecie, dotyczące przepuszczalności i dyfuzji gazów w materiałach pochodzenia syntetycznego.

W rozdziale 4, zatytułowanym *Koncepcja magazynowania mieszanek wodorowo – metanowych w wyrobiskach podziemnych*, zasygnalizowane zostały czynności związane z pracami adaptacyjnymi podziemnych wyrobisk, wskazano kluczowe czynniki dla prawidłowego prowadzenia prac geoinżynierskich, technicznych oraz dla bezpieczeństwa eksploatacji magazynów energii.

W rozdziale 5, zatytułowanym *Metodyka badań*, Autor przedstawił dwa stanowiska badawcze oraz metodykę obliczeniową do wyznaczenia przepuszczalności gazowej materiałów, w których następował przepływ gazu oraz do badań przenikalności gazowej próbek, w których następowała dyfuzja wodoru. Autor zaprezentował również metodę rachunku niepewności pomiarowej.

W rozdziale 6, zatytułowanym *Wyniki badań*, Autor zawarł wyniki pomiarów przepuszczalności gazowej wybranych materiałów izolacyjnych, możliwych do aplikacji na powierzchnie wyrobisk podziemnych. Przebadane zostało kilka grup materiałów, w tym: betony, geopolimery i polimerobeton oraz polimery syntetyczne, w tym żywica epoksydowa czysta oraz z różnymi domieszkami, żywica poliestrowa oraz poliuretan. Badaniom poddano również skały, w tym sól kamienną i mułowiec. Porównawczo przedstawiono także przepuszczalność stali nierdzewnej. Następnie zestawiono wyniki przepuszczalności wszystkich badanych materiałów oraz ich właściwości określone metodą skaningowej mikroskopii elektronowej. Przedstawiono prognozę ubytku wodoru ze zbiorników podziemnych wyposażonych w izolację skonstruowaną z badanych materiałów i skał.

W rozdziale 7, zatytułowanym *Zastosowanie modelu Maxwella*, przeprowadzono symulację zmiany wartości przepuszczalności względem wodoru wywołaną zmianą ilości wypełniacza w żywicy epoksydowej. Obliczone wartości zestawiono z wartościami uzyskanymi eksperymentalnie.

W ostatnich dwóch rozdziałach Autor dokonał podsumowania przeprowadzonych badań, nawiązał do idei realizacji Dysertacji i zamieścił Wnioski potwierdzające spełnienie założonych celów i tezy pracy.

3. Ocena rozprawy

a) Poziom naukowy pracy

Oceniana Dysertacja zawiera obszerny przegląd literatury, który potwierdza gruntownie przeprowadzoną analizę stanu wiedzy. W pracy zaprezentowane są testy eksperymentalne wraz z interpretacją ich wyników, które bardzo dobrze wpisują się w niszowe obszary z zakresu zagadnień dotyczących szczelności podziemnych magazynów względem wodoru i mieszanek wodorowo - metanowych. Doktorant metodami naukowymi osiąga podstawowy cel naukowy pracy – przyczynia się lepszemu poznaniu zjawisk dyfuzji i migracji gazów przez wybrane materiały, będące potencjalnie dobrymi izolatorami stosowanymi w magazynach gazów.

Część badawcza została poprawnie skomponowana. Autor przeprowadził badania na dwóch stanowiskach badawczych, których opis jest precyzyjny i świadczy o zrozumieniu zachodzących procesów, jak i świadomości kluczowych ograniczeń. Autor w sposób poprawny przeprowadził testy eksperymentalne, mające na celu potwierdzenie prawdziwości postawionej tezy. Dokonał On niezbędnych obliczeń oraz wykonał rachunek niepewności pomiarowej.

Do pracy zostały wytypowane liczne materiały: skały, betony i polimerobetony, geopolimery oraz polimery syntetyczne. Zbadano również wpływ dodatku do polimerów grafitu, haloizytu i popiołu lotnego na wybrane właściwości tych materiałów. W tym kontekście wysoko oceniam ilość przebadanych próbek, jak i celowość ich doboru.

Przeprowadzone badania stanowią znaczący wkład Autora w rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

b) Struktura rozprawy i wrażenia estetyczne

Przedstawiona do recenzji Dysertacja została przygotowana dość starannie. Posiada przemyślaną strukturę, zgodną z obowiązującymi standardami. W mojej opinii Autor mógłby

umieścić podrozdział 3.6, dotyczący rozważań teoretycznych procesu dyfuzji gazów, oraz część merytoryczną z rozdziału 7, dotyczącego zastosowania modelu Maxwella, do Metodyki badań. Oceniana praca zyskałaby wtedy na przejrzystości.

Autor poprawnie zapisuje równania, opisuje tabele i rysunki. Stosuje symbole wcześniej zdefiniowane. Jakość zdjęć, schematów i pozostałych rysunków jest na wysokim poziomie.

c) Uwagi krytyczne

- 1) Powszechnie wiadomo, że para wodna jest gazem cieplarnianym i odpowiada ona za znaczną część efektu cieplarnianego Ziemi. Proszę o komentarz dotyczący sformułowań [rozd. 3.1, str. 17]: „Wodór daje możliwość zasilania transportu kołowego z czystych, odnawialnych źródeł energii. Ponadto, jego spalanie powoduje emisję jedynie pary wodnej, co czyni go paliwem całkowicie bezemisyjnym.”, oraz: „Dodatek czystego wodoru do gazu ziemnego powoduje natomiast zmniejszenie ilości gazów cieplarnianych emitowanych z danej objętości takiej mieszanki w porównaniu z czystym gazem ziemnym (produktem ubocznym spalania wodoru jest para wodna)”.
- 2) W opisie dotyczącym sposobu magazynowania energii jest sprzeczność [rozd. 3.2 str. 19]. Autor podaje, że magazynowanie energii w postaci termalnej rozważane jest tylko dla małoskalowych i krótkoterminowych celów, po czym w kolejnym zdaniu wymienia zastosowanie termalnego magazynowania dla długoterminowego i wielkoskalowego magazynowania energii. Proszę o doprecyzowanie tej informacji.
- 3) W rozdziale 5 brakuje metodyki badań skaningowej mikroskopii elektronowej.
- 4) Zastosowane kilku metod do badań przepuszczalności: metody „Pulse Decay” i „Steady State Flow”, znacznie podnosi wartość merytoryczną Dysertacji. Interesuje mnie argumentacja wyboru tych metod oraz jaka jest podstawowa różnica w stosowalności tych metod.
- 5) We wzorze (5.3) brakuje informacji, że równanie to jest równaniem Darcy’ego pozwalającym wyznaczyć przepuszczalność ośrodków porowatych względem płynów ściśliwych. Ponadto w liczniku tego wzoru zamiast ciśnienia na wylocie próbki p_o powinno być ciśnienie atmosferyczne p_{atm} . Co prawda, w przypadku pomiarów filtracji gazów przez ośrodek porowaty, gdzie gaz przepływający przez próbkę odprowadzany jest bezpośrednio do atmosfery, ciśnienia

p_o i p_{atm} mają tę samą wartość, jednak zgodnie z przedstawioną metodyką pomiaru „Steady State Flow”, na wylocie próbki ciśnienie było regulowane za pomocą zaworu regulacyjnego (Rys. 5.2). Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności.

6) Czytając Dysertację, do pełnego spektrum badań brakuje mi analiz sorpcyjnych, które wniosłyby cenne informacje dotyczące ewentualnej reakcji wodoru z poszczególnymi materiałami izolującymi, tj. pojemności sorpcyjnej tych materiałów względem wodoru, kinetyki sorpcji oraz w efekcie wpływu działania wodoru na ich strukturę. Autor zamieścił co prawda kilka doniesień literaturowych poruszających zagadnienie sorpcji i zasygnalizował On, że proces sorpcji może mieć miejsce w niewielkim stopniu [rozd. 6.2, str. 102], ale ogólnie temat ten został przemilczany. Tyczy się to również badań gęstości. Przy tak kompleksowym podejściu do zagadnienia wykorzystania różnych materiałów w technologiach podziemnych magazynów energii, jaki prezentuje ta Dysertacja, proponuję Autorowi w kolejnych krokach badawczych poszerzyć spektrum o te analizy.

7) Pojawiają się drobne nieścisłości i nieprawidłowości w opisie parametrów, jednostek i tabel. Ogólnie przyjęta praktyka prezentacji wyników badań na wykresach zakłada opisywanie nazw parametrów na osiach, a nie jedynie ich jednostkę. Sugeruję uwzględnić to w publikacjach, które powstaną w oparciu o Dysertację, ponieważ niemal wszystkie wykresy nie posiadają opisanych osi Y.

8) Słowotwórstwo w Dysertacji wymaga korekcji, jeśli wyniki badań będą publikowane w czasopiśmie o zasięgu światowym. Zdania często nie posiadają podmiotu, wiele jest sformułowań potocznych, co znacznie utrudnia przekazanie merytorycznych treści. Autor posługuje się również nieprawidłowymi sformułowaniami. Używa On między innymi sformułowań: „skały izolacyjne” zamiast „skały izolujące”; „inżynierskich” zamiast „inżynieryjnych”; „ciśnienie utrzymujące (confining pressure)” zamiast „ciśnienie okólne”. Co ponadto oznacza sformułowanie „obciążenie gazu” (str. 31)? Czy przez „wypróżniowanie” Autor ma na myśli odgazowanie? Co to jest długotrwałe ciśnienie („wysokie i długotrwałe ciśnienie”, str. 80)? Co oznacza upakowanie struktury („większe upakowanie struktury”, str. 90)?

4. Wnioski końcowe

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta przedstawione w recenzowanej Dysertacji uważam kompleksowe zbadanie przepuszczalności oraz dyfuzji materiałów pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Wnioski z badań laboratoryjnych wskazują, że kilka z wytypowanych materiałów charakteryzuje się zadowalającym poziomem współczynnika przepuszczalności względem wodoru. Wnioski te potwierdzone są cyklem rzetelnych i przemyślanych badań, które wnoszą wartość poznawczą do dyscypliny. Dodatkowo, dzięki kreatywnej interpretacji wyników, poszerzonej o symulację numerycznej teoretycznej przepuszczalności gazowej materiałów z wypełniaczem, Autor potwierdził tezę swojej pracy.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie stanowiące element składowy bardzo ważnego problemu naukowego, jakim jest magazynowanie energii w postaci wodoru i mieszanek wodorowo – metanowych, pozyskanej z odnawialnych źródeł energii (OZE). Jednocześnie, Doktorant wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W mojej ocenie, rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Biorąc pod uwagę całokształt zrealizowanych prac oraz kluczowe osiągnięcie Doktoranta uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Gajdy „Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo – wodorowych. Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji” nosi znamiona oryginalności i mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie pracy przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Anna Pajdak