

Katowice, 02 sierpnia 2022 r.

Prof. dr hab. Adam Smoliński
Główny Instytut Górnictwa
Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice
asmolinski@gig.eu

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Dawida Gajdy

pt. „Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo-wodorowych. Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji.”

Podstawą opracowania niniejszej recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina z dnia 18 maja 2022 roku. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Marcin Lutyński, prof. PŚ.

1. Tematyka rozprawy doktorskiej i trafność jej wyboru

Praca poświęcona jest badaniom nad wykorzystaniem podziemnych wyrobisk w celu ich adaptacji na magazyny dla mieszanek wodorowo- metanowych. W pracy Doktorant rozważa również wykorzystanie wyrobisk drażonych w skale jak i nieczynnych wyrobisk górniczych poprzez ich adaptację i zastosowanie jako magazynów wodoru. Tematyka jest bardzo aktualna



w świetle odchodzenia od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii. Wysiłki naukowców na świecie skupiają się między innymi na otrzymaniu nowego, przyjaznego środowisku nośnika energii, jakim jest wodór. Obecnie w głównej mierze wodór pozyskiwany jest z paliw kopalnych na drodze reformingu parowego metanu, natomiast główne wysiłki naukowców skierowane są na rozwijanie nowych technologii produkcji tzw. zielonego (niskoemisyjnego) wodoru z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Dominującą rolę w tym obszarze przypisuje się procesowi elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (fotowoltaika, energia wiatru). Rozwój gospodarki wodorowej tworzy również potrzebę poszukiwania efektywnych sposobów magazynowania wodoru. W literaturze naukowej pojawiają się doniesienia o możliwości wykorzystania do tego celu podziemnych wyrobisk, jednak do tej pory nie przeprowadzono systematycznej analizy tego procesu.

W tę lukę badawczą wpisuje się praca doktorska Pana mgr inż. Dawida Gajdy, który przeprowadził systematyczne badania magazynowania wodoru w izolowanych zbiornikach podziemnych. W szczególności skupił się na analizie zjawisk dyfuzji wodoru przez warstwy izolacyjne takie jak betony, polimerobetony i żywice (aplikowane na powierzchni wyrobisk) oraz przez skały otaczające. Praca wpisuje się w światowy nurt badań nad nowymi sposobami magazynowania energii, co może przyczynić się do opracowania efektywnego sposobu magazynowania energii z wykorzystaniem infrastruktury pokopalnianej.

Reasumując uważam, że zaproponowany temat i zakres pracy doktorskiej wpisują się bez wątplenia w obszar ważnych i aktualnych problemów dotyczących efektywnych sposobów magazynowania energii w formie wodoru, który postrzegany jest obecnie jako nowy, perspektywiczny nośnik energii. Podjęcie tematu należy uznać za w pełni uzasadnione.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera 165 stron, 9 rozdziałów, 78 rysunków, 29 tabel i 120 pozycji bibliograficznych, wśród których dominują artykuły naukowe w języku angielskim z ostatnich kilku lat. Wśród cytowanych pozycji bibliograficznych 5 jest autorstwa lub współautorstwa Doktoranta.

Rozprawę doktorską rozpoczyna krótki Wstęp (rozdział 1), w którym Pan mgr inż. Gajda opisuje i uzasadnia problem badawczy związany z adaptacją podziemnych wyrobisk na magazyny dla mieszanek wodorowo-metanowych. Doktorant słusznie stwierdza, że mimo

intensywnie prowadzonych na świecie badań w zakresie szeroko rozumianego rozwoju badań nad otrzymywaniem i magazynowaniem wodoru wciąż brakuje prac mówiących o możliwościach wykorzystania potencjału podziemnych wyrobisk do celów magazynowania wodoru lub jego mieszanek z metanem. Po krótkim wprowadzeniu Doktorant jasno zdefiniował cel naukowy pracy, którym jest analiza zjawiska dyfuzji wodoru przez warstwy izolacyjne oraz skały otaczające, a także poznanie tego mechanizmu wraz z określeniem czynników, takich jak porowatość, mikrostruktura oraz skład mineralny lub chemiczny warstwy izolacyjnej, które wpływają na jego skalę (rozdział 2). Doktorant oprócz celu naukowego definiuje dwa cele użytkowe pracy, którymi są: opracowanie stanowiska badawczego, umożliwiającego badania zjawiska dyfuzji wodoru na podstawie bezpośrednich pomiarów stężeń wodoru przenikającego przez próbkę badanego materiału, oraz wytypowanie optymalnej powłoki izolacyjnej, możliwej do aplikacji na powierzchniach magazynów podziemnych, o zadowalających parametrach mechanicznych oraz izolacyjnych dla wodoru. Teza pracy mówiąca o tym, że 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 mogłaby zostać pominięta, gdyż stanowi jedynie rozszerzenie jednego z celów użytkowych rozprawy. W pracy Doktorant podjął się ambitnego zadania przeprowadzenia badań szeregu materiałów izolujących, takich jak betony, geopolimery, polimerbetony oraz żywice syntetyczne, w tym badań porównawczych ich szczelności ze szczelnościami naturalnych skał izolujących (skała mułowca oraz sól kamienna).

Rozważania w części teoretycznej pracy (rozdziały 3 i 4 pracy doktorskiej) Doktorant rozpoczyna od omówienia tzw. technologii Power-to-Gas i produkcji wodoru z procesie elektrolizy. Doktorant szczegółowo omawiając ww. technologie stwierdza, że jedna z nich polega na wykorzystaniu gazu odpadowego, który po zmieszaniu z wytworzonym wodorem (w procesie elektrolizy) tworzy wzbogacony biogaz (CH_3OH). Podany w pracy wzór nie jest wzorem biogazu, a wzorem alkoholu metylowego (metanolu). Biogaz zgodnie z definicją jest mieszaniną głównie metanu i ditlenku węgla i zawiera często niewielkie domieszki siarkowodoru, wodoru, wody czy tlenu węgla.

W swoich rozważaniach Doktorant słusznie zauważa, że technologie magazynowania energii są kluczowe w procesie produkcji energii z odnawialnych źródeł energii, które to źródła cechują się dużymi wahaniami w produkcji energii elektrycznej w czasie. W podsumowaniu tej części rozważań Pan mgr inż. Gajda zwraca uwagę na zalety stosowania wodoru, jako

paliwa bezemisyjnego (pod warunkiem, że otrzymywany jest z wykorzystaniem źródeł odnawialnych) oraz zalety związane z redukcją emisji ze spalania gazu ziemnego z domieszka wodoru wprowadzanego do rurociągu gazu zmiennego. W dalszej części rozważań teoretycznych pracy doktorskiej Doktorant szczegółowo omawia stosowane na świecie wielkoskalowe podziemne magazyny energii z wykorzystaniem struktur porowatych, pustek (pory, szczeliny) w strukturze skał, kawern solnych, oraz wyrobisk górniczych stosowanych do magazynowania gazów. W rozdziale poświęconym geotechnicznym aspektom wykorzystania wyrobisk podziemnych do magazynowania gazów, Doktorant słusznie stwierdza, że wykorzystanie zbiorników niskociśnieniowych będzie wymagało wyrobisk i pustek o bardzo dużych objętościach. Doktorant stwierdza, że pomocne, zapewne w celu efektywnego magazynowania gazów, będą „resztki węgla pozostawione w złożu”. Właściwości sorpcyjne węgla znacząco podnoszą pojemność magazynu niskociśnieniowego. W pracy podano, że zdolność sorpcyjna 1 Mg czystej substancji węglowej może wynieść do 20 m³ metanu. Brakuje tu jednak komentarza odnośnie warunków i intensywności desorpcji metanu. Chciałbym prosić o ustosunkowanie się do tej kwestii podczas publicznej obrony pracy.

W dalszej części analizy stanu wiedzy Doktorant szczegółowo opisuje kwestie związane z geomechaniką zbiorników podziemnych, bezpieczeństwem, materiałami stosowanymi w geoinżynierii oraz kosztami budowy magazynów energii i kosztami operacyjnymi magazynowania energii. Szczegółowo omawia m.in. magazynowanie wodoru w kawernach solnych. Wyjaśnienia wymaga podana wartość dziennego kosztu magazynowania na poziomie 0,19-0,27 USD.

W dalszych rozważaniach Doktorant szczegółowo opisuje badania związane ze zjawiskiem dyfuzji wodoru, zwracając uwagę na fakt, że szczelność zbiorników jest kluczowym aspektem w kwestii wykorzystania technologii podziemnego magazynowania wodoru. Doktorant słusznie stwierdza, że stan górotworu oraz obudowy szybu w bezpośredni sposób warunkuje możliwość wykorzystania wyrobiska do celów adaptacji na magazyn energii. Wymaga to jednak szerszego komentarza podczas publicznej obrony.

Na koniec przedstawionego stanu wiedzy zabrakło jednak krótkiego, syntetycznego podsumowania części literaturowej, uzasadniającego cel prowadzenia podjętych badań i stanowiącego nawiązanie do kolejnej części rozprawy, przedstawiającej metodykę i część badawczą.

W rozdziale 5 pracy szczegółowo opisano stanowisko badawcze wraz z metodyką obliczeniową, które zostały wykorzystane do przeprowadzenia kompleksowej analizy przepuszczalności badanych próbek. W rozdziale tym Doktorant opisuje szczegółowo metody Steady-State oraz Pulse-Decay służące do opisanie przepuszczalności gazowej próbek oraz metodę Carrier gas służącą do badania przenikalności gazowej badanych próbek.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawia wyniki badań własnych dotyczących przepuszczalności różnych badanych materiałów i skał. Wśród materiałów w ramach pracy doktorskiej przebadano betony, polimerobetony, geopolimery, polimery syntetyczne a także dwa rodzaje skał: mułowiec oraz sól kamienna. Szerszego uzasadnienia wymaga jednak sposób doboru materiałów do badań. W pracy doktorskiej podano jedynie, że selekcja materiałów nastąpiła na podstawie informacji dostępnych w literaturze na temat właściwości izolacyjnych dla gazów. W przypadku polimerów syntetycznych Doktorant stwierdza, że „ich wachlarz jest duży”, ale ze względu na długotrwały proces analizy pojedynczej próbki wytypowano kilka materiałów o niskich współczynnikach przepuszczalności gazów. Badania prezentowane w literaturze były jednak prowadzone dla innych gazów niż wodór. Czy to nie miało wpływu na poprawność wyboru materiałów do badań? Prosiłbym o krótki komentarz na ten temat podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 7 Doktorant poświęca dużo uwagi zagadnieniom związanym z przepuszczalnością gazową stosowanych barier, która uwarunkowana jest poza współczynnikiem przepuszczalności samego polimeru, również m.in. rodzajem, ilością, rozmiarem oraz rozprzestrzenianiem się wypełniacza w polimerze, co wpływa na wydłużenie dróg migracji cząsteczek gazu, a tym samym na ograniczenie przepuszczalności gazowej. W pracy doktorskiej poświęcono również dużo uwagi kwestii symulacji numerycznych przepuszczalności gazowej bariery z wypełniaczem z zastosowaniem modelu Maxwella.

Część dotyczącą badań własnych kończy rozdział 8, w którym Doktorant w sposób zwięzły przedstawia podsumowanie i dyskusję otrzymanych wyników. W rozdziale 9 z kolei, Doktorant prezentuje główne wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej.

Czytając rozprawę doktorską zauważono pewne niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym. Wybrane z nich przedstawiono poniżej:

- ✓ W całej pracy Doktorant konsekwentnie używa błędnej terminologii „dwutlenek węgla”, powinno być „ditlenek węgla” (np. str.10, 17, 97)
- ✓ Na Rys. 3.5 legenda została umieszczona z boku rysunku, a nie jak na pozostałych rysunkach na dole, przez co rysunek jest mało czytelny.
- ✓ Doktorant często stosuje kolokwializmy, np. str. 26: „Od głębokości zalegania złoża soli zależeć będzie także ciśnienie robocze zbiornika, **a co za tym idzie**, także jego pojemność ...”.
- ✓ W całej pracy powinny być konsekwentnie stosowane jednostki SI, np. na str. 27 jest mowa o 11 mln ton węgla, a powinno być 11 mln Mg węgla, itp.
- ✓ W języku polskim wartości dziesiętne podawane są po przecinku, a nie jak w języku angielskim po kropce (patrz np. str. 28 jest „dochodziło do 1.8 MPa” a powinno być „1,8 MPa” czy „...przy ciśnieniu roboczym do 4.0 MPa” a powinno być „4,0 MPa”).
- ✓ Nie uniknięto drobnych potknięć o charakterze edycyjnym (np. na str. 8 jest „Cel naukowym jest:” a powinno być „Celem naukowym pracy jest:”; na str. 10 jest „...w procesie metanizacji ...” a powinno być „...w procesie metanizacji...”; str. 40 jest „...podłużyły do celów projektowych” a powinno być „...posłużyły do celów projektowych”; str. 44 jest „...jogo wysokie koszty...” a powinno być „...jego wysokie koszty...”; interpunkcja na str. 46 jest „...dla następujących założeń” powinno być „...dla następujących założeń:”).
- ✓ W spisie literatury dla pozycji [27], [63], [118] nie wymieniono wszystkich autorów prac, jak w przypadku wszystkich pozostałych pozycji literaturowych.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Dawida Gajdy spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. Poz. 595 z późniejszymi zmianami). Zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z wnioskiem o dopuszczenie mgr inż. Dawida Gajdy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

