Krosno, 5.07.2022 r.

dr hab. inż. Piotr Kasza, prof. INiG-PIB
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
e-mail: kasza@inig.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Dawida Gajdy, pt.:

„Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo-wodorowqych. Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji"

Podstawa recenzji

Podstawą przygotowania niniejszej recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 28.04.2022 oraz pismo nr RIE-BD.512.27.2022 z dnia 18.05.2022 powierzające mi zadanie wykonania recenzji pracy doktorskiej Pana mgr inż. Dawida Gajdy, pt.: „Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo-wodorowych. Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji"

Podstawowe informacje o kandydacie

Pan mgr inż. Dawid Gajda w czerwcu 2014 roku uzyskał tytuł magistra inżyniera w specjalności Przeróbka Kopalin Stałych i Marketing na kierunku Górnictwo i Geologia w Instytucie Eksploatacji Złóż, Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w Katowicach.

Następnie w lipcu 2015 roku uzyskał tytuł magistra inżyniera w specjalności Geologia Górnicza i Poszukiwawcza na kierunku Górnictwo i Geologia w Instytucie Geologii Stosowanej, Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w Katowicach.

Kandydat nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora. Kariera naukowo-zawodowa Doktoranta miała następujący przebieg.

Od grudnia 2014 roku do chwili obecnej prowadzi jednoosobową działalność gospodarczą w firmie Nova Prospect Geologia Geotechnika w dziedzinie geologii inżynierskiej. Od roku 2017 jest to praca o charakterze sezonowym. W lipcu 2017 podjął pracę w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym w obserwatorium meteorologicznym na stacji synoptycznej Racibórz, gdzie nadal pracuje. W październiku 2017 roku podjął studia III stopnia w Katedrze Eksploatacji Złóż Wydziału Górnictwa, Inżynierii i Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej, które nadal kontynuuje. W okresie od maja do sierpnia 2019 odbył staż naukowy w Department of Energy and Mineral Engineering, Pensylvania State University, State College, PA, Stany Zjednoczone Ameryki.

Omówienie pracy

Przedłożona do recenzji praca zredagowana została w języku polskim. Składa się z 9 następujących rozdziałów: wstęp, teza i zakres pracy, aktualny stan wiedzy, koncepcja magazynowania

mieszanek wodorowo-metanowych w wyrobiskach podziemnych, metodyka badań, wyniki badań, zastosowanie modelu Maxwella, podsumowanie i dyskusja wyników, wnioski. Rozprawa zawiera łącznie 165 stron tekstu wraz z rysunkami i tabelami. W pracy umieszczono łącznie 64 rysunków i 29 tabel. Ich spis znajduje się po ostatnim rozdziale. Dalej Autor zamieścił spis literatury obejmujący 120 pozycji oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1 Pan mgr inż. Dawid Gajda dokonał wprowadzenia w tematykę pracy doktorskiej. Zaznaczył, że jest ona związana z procesem odchodzenia od energetyki konwencjonalnej opartej na surowcach kopalnych na rzecz energetyki bazującej na odnawialnych źródłach energii (OZE). Jest to aktualny kierunek transformacji energetycznej zdefiniowany w realizowanych politykach krajowych i Unii Europejskiej. Jak podaje Autor wykorzystanie niekonwencjonalnych źródeł energii jak choćby solarnych i wiatrowych wiąże się z ich duża niestabilnością. Okresy intensywnej produkcji energii z tych źródeł przeplatane są okresami minimalnej lub wręcz brakiem produkcji. Są one związane w dużej mierze z warunkami pogodowymi, co powoduje ich nieprzewidywalność. Pomocne w rozwiązaniu tego problemu mogą być wielkoskalowe magazyny energii. Ich wykorzystanie umożliwi gromadzenie energii w okresach nadprodukcji oraz jej wykorzystanie w czasie wzmożonego zapotrzebowania. Sposobów magazynowania energii jest przynajmniej kilka, natomiast Doktorant skoncentrował się na wykorzystaniu wodoru jako nośnika energii. Nadwyżki produkcji energii elektrycznej ze źródeł OZE wykorzystywane mogą być do wytwarzania wodoru w procesie elektrolizy, po czym może on być magazynowany. Jako przykład efektywnych i technicznie możliwych sposobów magazynowania wodoru Autor wskazuje struktury podziemne tj. kawerny solne, sczerpane złoża węglowodorów oraz warstwy wodonośne. Wodór ze względu na swoje właściwości jest trudny do magazynowania. Charakteryzuje się dużą zdolnością do dyfuzji przez różne materiały, co jest związane niewielkim rozmiarem cząsteczki oraz sprzyja zjawisku korozji wodorowej stali, zwanej kruchością wodorową. W swojej pracy Doktorant przedstawia koncepcję magazynowania wodoru i paliw metanowo wodorowych w wyrobiskach podziemnych. Zakłada ona możliwość tworzenia tego typu obiektów w nieczynnych wyrobiskach górniczych (zazwyczaj szybów) lub tworzenia specjalnie drążonych i izolowanych wyrobisk (Lined Rock Caverns). Wykorzystanie tego typu magazynów wodoru i paliw wodorowych wiąże się z koniecznością zapewnienia bardzo dobrej szczelności tych obiektów. W tym celu poddano badaniom i analizom szereg materiałów mogących służyć do uszczelniania tych struktur. Badania te wykonano również dla wybranych skał i minerałów. Do oceny skuteczności uszczelniania Autor pracy wybrał wskaźniki opisujące zjawiska dyfuzji i przepuszczalności wodoru i mieszanek metanowo-wodorowych dla różnych materiałów. Rozdział ten został poprawnie zredagowany. Przedstawiono w nim szerokie spektrum zagadnień związanych z magazynowaniem energii.

W rozdziale 2 Pan mgr inż. Dawid Gajda przedstawia zakres i tezę swojej pracy doktorskiej. Jako cel naukowy Autor stawia sobie analizę zjawisk dyfuzji wodoru przez warstwy izolacyjne oraz skały otaczające, poznanie tego mechanizmu wraz z określeniem czynników wpływających na jego wielkość. Jako cele utylitarne wymieniono skonstruowanie stanowiska do badań dyfuzji wodoru przez różne materiały oraz wytypowanie efektywnej powłoki izolacyjnej mogącej mieć zastosowanie w uszczelnianiu podziemnych magazynów wodoru. W wyniku podjętych prac badawczych Doktorant zamierza zweryfikować postawioną tezę, że istnieją możliwości wytypowania powszechnie dostępnych materiałów mogących stanowić efektywne powłoki izolacyjne możliwe do aplikacji na powierzchniach podziemnych magazynów wodoru lub mieszanin metanowo-wodorowych. Realizację tych celów Doktorant zamierza osiągnąć poprzez wytypowanie odpowiednich materiałów oraz badania i analizę zjawisk przepuszczalności i dyfuzji gazów przez te materiały. Cele pracy oraz postawiona teza zredagowane zostały w sposób czytelny.

Kolejnym, obszernym rozdziale 3 Doktorant przedstawia aktualny stan wiedzy i techniki. W kilku podrozdziałach przedstawiono wiele aspektów związanych z przyjętym zakresem pracy. W pierwszej części wskazano metody wytwarzania wodoru z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii i konieczność jego magazynowania związaną z niestabilnością tych źródeł. Dalej Autor dokonuje przeglądu różnych metod magazynowania energii, wskazując wielkoskalowe magazynowanie energii jako najbardziej efektywne dla bilansowania energii w sieci energetycznej. Spośród tych metod jako najbardziej perspektywiczna wydaje się metoda podziemnego magazynowania wodoru lub paliw

wodorowych (mieszanin wodoru z metanem). Dalej zaprezentowano możliwe sposoby podziemnego magazynowania gazów (struktury porowate, warstwy wodonośne, wyeksploatowane złoża węglowodorów, kawerny solne, wyrobiska górnicze kopalń podziemnych oraz specjalnie wykonane wyrobiska podziemne) i dokonano ich ogólnej charakterystyki na podstawie literatury. Dalej w rozdziale 3 Pan mgr inż. Dawid Gajda dokonuje oceny aspektów geotechnicznych różnych podziemnych wyrobisk dla celów magazynowania gazów wskazując istotne różnice, wady i zalety poszczególnych rozwiązań oraz nieodzowne kwestie bezpieczeństwa. Autor porusza też niezwykle istotną kwestię uszczelniania niektórych rodzajów wyrobisk oraz wskazuje metody ich wykonania. Uzupełnieniem poruszanych zagadnień jest przedstawiona analiza kosztów przedsięwzięć związanych z budową i eksploatacją wybranych magazynów energii w postaci sprężonych gazów. Na zakończenie tego rozdziału Doktorant dokonuje analizy i oceny istotnych zjawisk fizycznych mających decydujący wpływ na funkcjonowanie i bezpieczeństwo magazynów wodoru i mieszanek metanowo-wodorowych w wyrobiskach podziemnych. Zaliczono do nich zjawisko dyfuzji i przepuszczalności wymienionych gazów. Mimo, że rozdział ten jest obszerny, nie zawiera informacji zbędnych. Poszczególne rozdziały stanowią logiczną całość. Autor nie ustrzegł się pewnych potknięć, które zostaną wskazane w dalszej części recenzji.

Rozdział 4 poświęcony został przedstawieniu koncepcji magazynowania gazów w wyrobiskach podziemnych. Jak podaje Autor, magazynowanie wodoru i paliw wodorowych w kawernach solnych jest już dobrze poznaną i przetestowaną technologią. Jedną z podstawowych wad tej metody jest znalezienie odpowiednich struktur solnych dających możliwość wykonania kawern. Jest to oczywiście zdeterminowane budową geologiczną, zatem lokalizacja potencjalnych magazynów gazu w kawernach solnych jest z góry określona przez naturę. Transformacja energetyczna i wykorzystanie w pełni potencjału OZE wymaga różnych, bardziej równomiernych, lokalizacji magazynów energii. Dlatego koncepcja adaptacji istniejących górniczych wyrobisk podziemnych lub wykonanie dedykowanych wyrobisk wydaje się naturalnym i koniecznym rozwiązaniem. Jako kluczowy element wykorzystania tych rozwiązań geotechnicznych, Autor wskazuje kwestie związane z ich uszczelnieniem. Jest to bezwzględny warunek utworzenia i prawidłowego funkcjonowania wielkoskalowego magazynu gazu. Stwierdzenia i konkluzje z tego rozdziału bezpośrednio nawiązują do kolejnego rozdziału pracy. Ta część pracy w sposób czytelny przedstawia pogląd Doktoranta w zakresie koncepcji podziemnego magazynowania mieszanek metanowo-wodorowych.

W rozdziale 5 mgr inż. Dawid Gajda prezentuje przyjętą metodykę badań realizowanych w ramach pracy. Wskazuje On, że do oceny skuteczności uszczelnienia należy wykonać badania przepuszczalności i przenikalności gazów przez badane materiały uszczelniające. Do badań przepuszczalności gazów zaproponowano metody Steady-Staty oraz Pulse-Decay. W metodach tych przepływ gazu przez badany materiał następuje w wyniku wytworzonego gradientu ciśnienia. Kolejna zaproponowana metoda pomiarowa pozwala ocenić właściwości uszczelniające różnych materiałów poprzez badanie zjawiska dyfuzji gazu. W tym przypadku mechanizmem inicjującym zjawisko dyfuzji jest istniejący gradient koncentracji. Do realizacji tego celu badawczego pracy Autor zaproponował wykorzystanie metody pomiarowej Carier Gas. W dalszej części tego rozdziału przedstawiono metodykę wykonania poszczególnych rodzajów badań a także sposób obliczeń i analizy wyników badań. Jak podaje Doktorant badania metodami Steady-Staty oraz Carier Gas zostały wykonane w Laboratoriach Politechniki Śląskiej w Gliwicach, natomiast badania metoda Pulse-Decay zrealizowano w ramach stażu odbytego w Pennsylvania State University. W dalszej części rozdziału 5 zaprezentowano stanowiska badawcze wykorzystane do realizacji badań. Na podkreślenie zasługuje fakt opracowania koncepcji i wykonanie nowego stanowiska badawczego do badań metodą Carier Gas. Powstało ono poprzez modyfikację istniejącego stanowiska do badań Steady-Flow. Ponadto przygotowanie nowego okładu pomiarowego wymagało opracowania metodyki badań oraz sposobu analizy i interpretacji wyników. Świadczy to o twórczym i oryginalnym podejściu Autora do rozwiązywania zagadnień badawczych. Ostatnia część tego rozdziału poświęcona jest metodzie oceny niepewności uzyskanych wyników oraz ich powtarzalności. Jako właściwą metodę wskazano ocenę niepewności standardowej oraz niepewności maksymalnej. Przyjęto poprawne metody badawcze do realizacji zamierzonych celów i weryfikacji tezy pracy.

Rozdział 6 poświęcono prezentacji wyników wykonanych badań. W pierwszej kolejności Autor wytypował materiały do badań służące uszczelnianiu podziemnych wyrobisk do celów magazynowania gazów. Materiały te podzielono na dwie grupy. Aplikowane na powierzchnie wyrobisk celem ich uszczelnienia (betony, geopolimery, polimerobetony, żywice syntetyczne) oraz naturalne skały uszczelniające (sól kamienna i mułowiec) stanowiące naturalne uszczelnienie kawern solnych. Do badań w pierwszym etapie wytypowano dwa typy betonu sporządzone z różnych cementów wraz z dodatkami, jeden geopolimer oraz dwa polimerobetony. Następnie podano warunki wykonania poszczególnych testów. Na uwagę zasługuje fakt, że pomiary wykonano również na próbce archiwalnej z roku 2016 (Beton 2) co pozwala na dodatkową interpretację uzyskanych wyników dotyczącą wpływu starzenia się materiału na efektywność uszczelnienia. Zgodnie z przyjętym planem, badania przepuszczalności wykonano dwiema metodami Steady-State oraz Pulse-Decay. Wyniki zestawiono w tabeli 6.4 oraz 6.5. Wykonane badania przepuszczalności oraz analiza obrazów SEM materiałów bazujących na betonie skłania Autora do wniosku, że charakteryzują się one pewnym granicznym współczynnikiem przepuszczalności, który nie może być obniżony. Związane jest to z wieloziarnową strukturą tych materiałów. Dalsze testy prowadzono na żywicach syntetycznych. Ta seria badań dotyczyła pięciu próbek żywicy epoksydowej (z różnymi domieszkami), żywicy poliestrowej i poliuretanu. W przypadku żywic wykonano badania dyfuzji, a współczynnik przepuszczalności wyznaczany był analitycznie na podstawie badań Carrier Gas. Wyniki zaprezentowano w tabeli 6.10, umieszczając w niej również literaturowe dane dotyczące stali 316SS. Badania żywic uzupełnia analiza obrazów SEM oraz wyniki badań wytrzymałościowych (tabela 6.13). Jak wynika z tej części badań, żywice są dobrym materiałem uszczelniającym. Ostatnią grupą badanych materiałów są skały stanowiące uszczelnienie kawern solnych. Autor prawidłowo wytypował dwa rodzaje skał tj. sól kamienną i mułowiec. Wyniki badań skał przedstawiono w tabeli 6.15 oraz uzupełniono opisem zdjęć SEM. W podsumowaniu części badawczej zaprezentowano zbiorczą tabelę z wynikami badań wszystkich próbek (tabela 6.17), która zdecydowanie ułatwia analizę uzyskanych wyników i formułowanie wniosków. W zakończeniu rozdziału 6 Doktorant przedstawia interesująca analityczną prognozę ubytku wodoru przez warstwy izolacyjne. Rozdział ten stanowi spójny i logicznie zaprezentowany materiał badawczy.

W rozdziale 7 Pan mgr inż. Dawid Gajda zaprezentował wyniki symulacji numerycznej teoretycznej przepuszczalności gazu dla teoretycznej bariery polimerowej, z wykorzystaniem modelu Maxwella. Wykonane symulacje pozwalają ocenić efektywność stosowanych wypełniaczy. Wyniki symulacji dla różnych ich rodzajów zestawiono w tabeli 7.1, natomiast porównanie danych z symulacji z danymi eksperymentalnymi w tabeli 7.2. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność modelu symulacyjnego, a jednocześnie umiejętności Doktoranta w zakresie wykorzystywania różnych narzędzi w pracy badawczej.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i dyskusję wyników. Wykonane i zmodyfikowanie stanowiska badawczego, opracowanie procedur pomiarowych oraz metod analizy uzyskanych wyników stanowią istotny wkład Doktoranta w rozwój badań nad warstwami izolacyjnymi mogącymi znaleźć zastosowanie przy wielkoskalowym magazynowaniu wodoru lub mieszanin metanowo-wodorowych. Wyniki badań różnego rodzaju betonów dowodzą o istnieniu granicznej przepuszczalności tych materiałów, która może być niewystarczająca do uszczelnienie magazynu wodoru. Sól kamienna i mułowiec posiadają również graniczne przepuszczalności, jednak proces pełzania soli pod wpływem zastosowanego ciśnienia powoduje zmniejszenie współczynnika przepuszczalności o 5 rzędów, co jest zadawalającym wynikiem. Najbardziej perspektywicznymi materiałami do wykonywania powłok uszczelniających podziemne magazyny gazu są żywice, zwłaszcza epoksydowa i poliuretanowa. Na zakończenie rozdziału Autor stwierdza, że perspektywicznymi rozwiązaniami magazynowania wodoru i mieszanin metanowo-wodorowych są zarówno kawerny solne jak również wyrobiska podziemne.

We wnioskach przedstawionych w rozdziale 9 Autor stwierdza, że cel naukowy jakim było poznanie zjawisk dyfuzji został osiągnięty. Założone cele utylitarne takie jak utworzenie, sprawdzenie i wykorzystanie do badań nowego stanowiska badawczego oraz wytypowanie materiału do wykonania efektywnej powłoki izolacyjnej magazynu wodoru zlokalizowanego w wyrobisku podziemnym zostały zrealizowane. Również postawiona teza, że istnieje możliwość wytypowania powszechnie dostępnych

materiałów, które mogą być wykorzystane do przygotowania warstw izolacyjnych na powierzchni tworzonych podziemnych magazynów wodoru lub mieszanek metanowo-wodorowych.

Dalsze części pracy doktorskiej stanowią spis rysunków i tabel, spis literatury w którym umieszczono 120 pozycji. Sporo pozycji literaturowych jest polskojęzyczna natomiast przewagę stanowią publikacje anglojęzyczne. Pozycje literaturowe pochodzą z lat od 1960 do 2021 z zaznaczeniem, że zdecydowana większość cytowanych opracowań to materiał sprzed kilku lub kilkunastu lat. Co świadczy o dobrym doborze materiału literaturowego. Pracę zakończono jednostronicowym streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Uwagi i kwestie dyskusyjne

Przedstawiona do recenzji praca jest rezultatem wielokierunkowych działań podjętych przez Doktoranta. Zawiera wszystkie niezbędne elementy opracowania naukowego. W trakcie lektury tej ciekawej pracy zauważono pewne drobne niedociągnięcia i nieścisłości, które przedstawiam poniżej. Mogą one stanowić podstawę do dyskusji podczas obrony pracy doktorskiej jak również być przydatne w przypadku publikacji prezentowanego materiału.

Str. 2 – w celu utylitarnym Autor wymienia „...opracowanie optymalnej powłoki..." Proponuje użycie słowa skutecznej bądź efektywnej. Proces optymalizacji jest znacznie bardziej skomplikowany niż przedstawionej w niniejszym opracowaniu.

Str. 11 – Doktorant zaznacza, że OZE charakteryzują się nieregularnością produkcji energii związaną z warunkami atmosferycznymi czy porą dnia. Warto było by zaznaczyć, że wolna od tych wad jest energia geotermalna.

Str. 14 – Stwierdzenie, że zaletą elektrowni szczytowo pompowych jest bardzo szybki rozruch (do 3 minut). Zdaniem recenzenta czas jest podany prawidłowo natomiast nie można tego uznać za szybki rozruch. Efektywne sterowanie siecią energetyczną wymaga dostępności energii w czasie mierzonym w sekundach.

Str. 15 – Autor stwierdza, że istnieje możliwość przesyłania mieszanin metanowo-wodorowych przy wykorzystaniu istniejącej infrastruktury gazowej. Na chwilę obecną w Polsce nie ma ani możliwości prawnych ani technicznych wprowadzenia do sieci gazowej dodatku wodoru. Owszem są prowadzone badania w tym kierunku i pewne wytyczne zostały przygotowane natomiast brak jest decyzji umożliwiających transport wodoru lub mieszanin metanowo-wodorowych istniejąca siecią gazociągów.

Str. 21 – „ ... przez wtłoczenie tego nośnika przez otwór wiertniczy ..." Termin otwór wiertniczy pojawia się wielokrotnie w pracy, lecz nie za każdym razem jest poprawnie użyty. Terminem „otwór" określa się podziemne wyrobisko drążone metoda wiertniczą, które nie jest uzbrojone i wyposażone. Po ukończeniu wiercenia wprowadza się do otworu rury okładzinowe a następnie zbroi się w rury wydobywcze i głowicę i taką konstrukcję zwykło się nazywać odwiertem. Zatem zatłaczanie i odbiór gazu odbywać się może jedynie z wykorzystaniem odwiertu.

Str. 21 – Autor podaje łączna pojemność podziemnych magazynów gazu w Polsce równa 2,1 mld m^3 bazując na literaturze z lat 2008 i 2014, dane te odbiegają od rzeczywistych bowiem w dniu 4 lipca 2022, pojemność magazynów wynosi 3 230,62 mln m^3, co łatwo sprawdzić używając linka: https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/transparency-template/?page=uslugi-i-infrastruktura/parametry-techniczne/. Mimo, że dane te w żaden sposób nie wpływają na jakość pracy badawczej, recenzent zaleca większą skrupulatność w prezentowaniu danych literaturowych i bazowanie na najbardziej aktualnych informacjach.

Str. 22 – Nieprecyzyjne dane dotyczące pojemności PMG Mogilno i Kosakowo (jw.)

Str. 36 - „... uszczelnionego zbiornika LRC w Szwecji to 20-30 MPa (200 barów)" Należy uzupełnić „... (200-300 bar)

Str. 41 – Doktorant pisze o nieudokumentowanych otworach wiertniczych. Czy Autora ma na myśli nieudokumentowane odwierty wykonane z powierzchni? Co trudno w ogóle sobie wyobrazić, czy odwierty wykonywane z kopalń? Czy w ogóle mogą istnieć nieudokumentowane otwory?

str. 46 - Podano założenia techniczne budowy magazynu LRC i w kawernie solnej, co stało się podstawą analizy kosztów. Zdaniem recenzenta podane powinny być konkretne argumenty za tak przyjętymi parametrami. Na przykład, że przyjmując takie parametry w obu typach magazynów można przechować porównywalne porcje energii.

Str. 63 – Autor podaje, że stanowisko składa się z komory trójosiowego ściskania próbki. Należy doprecyzować, że w komorze występuje szczególny przypadek trójosiowego stanu naprężeń, w którym naprężenia: ciśnienie uszczelniające -confining pressure spełnia warunek $\delta_x=\delta_y$ oraz naprężenie osiowe δ_z.

Str. 64 – Opisując symbole we wzorze 5.1, oraz w innych miejscach pracy (np. tabela 6.10, tabela 6.15), Autor posługuje się zwyczajowym określeniem wielkości k_a jako przepuszczalności. Poprawna nazwa tej wielkości to współczynnik przepuszczalności.

Str. 66 – Zauważono niekonsekwencję w terminologii. Na rys. 5.2 jeden z elementów nazwany jest „zbiornikiem gazu", natomiast w opisie pojawia się określenie „rezerwuar".

Str. 68 – Komentarza wymaga zastosowanie bardzo wysokiego „confining pressure" na poziomie 200% ciśnienia przepływu. Zazwyczaj w pomiarach współczynnika przepuszczalności stosuje się stałe Δp (0,34-0,69 MPa) w odniesieniu do ciśnienia przepływu. Zbyt duże ciśnienie uszczelniające może powodować intensywne zamykanie kanałów porowych i mikroszczelin, zniekształcając wyniki pomiarów. Czy tak duże ciśnienie uszczelniające jest związane z używanymi do pomiarów gazami?

Str. 80 – Skoro na stronach 112-116 Autor podaje wyniki badań wytrzymałościowych wybranych materiałów, wskazane byłoby umieścić krótki opis tych badań właśnie na stronie 80.

Str. 89 – Zapewne wyniki i wnioski wypływające z zastosowania różnych ciśnień uszczelniających są słuszne (Tabela 6.4, Rysunek 6.3), jednak do pełnej oceny warunków prowadzenia testu powinno być podanie ciśnienia przepływu. Czy było ono stałe dla różnych wartości ciśnienia uszczelniającego?

Poza wymienionymi uwagami zauważono w przedstawionym tekście nieliczne błędy literaturowe jak również drobne uchybienia w prezentacji pozycji literaturowych (np. brak daty publikacji – pozycja 40).

Przedstawione powyżej uwagi dyskusyjne nie umniejszają walorów naukowych przedstawionej rozprawy. Uważam ją za ciekawą i wartościową. Wykazane niedoskonałości świadczą jedynie o złożoności prezentowanych przez Doktoranta zagadnień.

Zgodność rozprawy doktorskiej z Ustawą

Ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity Dz. U. z 16 marca 2021 r., poz. 478) w artykule 187 określa następujące wymagania dla rozprawy doktorskiej:

1. *„Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej".*
   Stwierdzam, że Pan mgr inż. Dawid Gajda posiada szeroką i głęboką wiedzę teoretyczną w Dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.
2. *„Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne".*
   Stwierdzam, że Doktorant w przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim było opracowanie materiałów do skutecznej izolacji wyrobisk podziemnych celem ich wykorzystanie do magazynowania wodoru i mieszanin metanowo-wodorowych.
3. *„Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej".*

„Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim".
Do recenzji Pan mgr inż. Dawid Gajda przedstawił pracę pisemną, monografię naukową zawierającą streszczenie w języku polskim i języku angielskim.

Podsumowanie

Recenzowana praca doktorska Pana mgr inż. Dawida Gajdy stanowi oryginalne opracowanie naukowe o walorach utylitarnych. Plan pracy został w pełni zrealizowany, założone cele osiągnięte a postawiona teza została zweryfikowana i potwierdzona wynikami przeprowadzonych badań. Wskazane w pracy cele utylitarne i wytyczenie nowych kierunków w obszarze przygotowywania magazynów wodoru i mieszanin metanowo-wodorowych w wyrobiskach podziemnych, należy uznać za szczególne osiągnięcie tej pracy. W mojej ocenie, przedstawiona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Dawida Gajdy stanowi kompletny materiał dobrze zaplanowanych i zrealizowanych badań naukowych.

Wnioski końcowe

Stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Dawida Gajdy pt.: „Migracja wodoru z podziemnych magazynów mieszanin metanowo-wodorowych. Zagadnienia przepuszczalności i dyfuzji" spełnia wymagania ustawowe i wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do dalszego toku przewodu doktorskiego.

Podpisał Piotr Kasza