

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Sygały

1. Przedmiot recenzji

Recenzja niniejsza została zrealizowana na zlecenie Naczelnego Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach - pismo ND/NSR/266/2014 z dnia 10-12-2014 r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Wpływ temperatury na właściwości skał w procesie podziemnego zgazowania węgla”. Autorką rozprawy jest mgr inż. Anna Sygała, która ubiega się o nadanie jej stopnia naukowego doktora nauk technicznych przez Radę Naukową Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach. Promotorem przedstawionej pracy jest dr hab. Mirosława Bukowska , profesor GIG.

Po analizie rozprawy stwierdzam, że jej tematyka mieści się w obszarze dyscypliny naukowej: Górnictwo i Geologia Inżynierska.

2. Wstęp

Bezpieczeństwo energetyczne Polski, w którego tle splatają się naciski i wpływy przeróżnych grup interesu, zarówno tych krajowych jak i tych europejskich, a także obecny stan zasobów surowców energetycznych oraz perspektywy ich eksploatacji w przyszłości, implikują potrzebę rozwijania nowych metod zagospodarowania złóż węgla kamiennego, który jeszcze przez dziesiątki lat będzie jednym z podstawowych źródeł energii produkowanej w naszym kraju. Mając na uwadze relację pomiędzy obecną ceną węgla kamiennego na rynku i kosztami jego wydobycia oraz kierunki polityki UE w zakresie ochrony środowiska i walki ze zmianami klimatycznymi, nie ulega wątpliwości, że tylko niekonwencjonalne technologie eksploatacji złóż węgla kamiennego sprostają wyzwaniom przed jakimi stoi polski przemysł wydobywczy. Jedną z perspektywicznych i względnie tanich metod wykorzystania złóż węgla kamiennego jest podziemne jego zgazowanie, szczególnie tam, gdzie stosowanie tradycyjnej eksploatacji jest niemożliwe lub ekonomicznie nieopłacalne. Podziemne zgazowanie węgla (PZW), obecnie cieszące się dużym zainteresowaniem jako substytut tradycyjnych kopalni podziemnych, natrafia jednakże na określone bariery w rozwoju, związane przede wszystkim z różnymi aspektami bezpieczeństwa prowadzenia procesu. Ponieważ do tej pory próby realizacji wspomnianej technologii odbywały się w skali laboratoryjnej/półtechnicznej lub w skali technicznej lecz w wyjątkowo sprzyjających warunkach geologicznych, nie została ona na tyle dobrze rozpoznana aby móc uznać ją za w pełni bezpieczną i w każdym przypadku w pełni kontrolowaną z punktu widzenia bezpieczeństwa środowiskowego, a szczególnie pod względem potencjalnych deformacji powierzchni terenu. Z tym też zagadnieniem wiąże się problem stateczności lub niestateczności górotworu w otoczeniu rozległej parceli pokładu węgla poddanego procesowi zgazowania. Analiza stateczności wyrobiska jakim jest przestrzeń zgazowanego materiału, ma zatem za zadanie

przewidzieć deformacje górotworu i związane z tym zmiany stanu naprężenia, które z kolei mogą doprowadzić do zanieczyszczenia wód podziemnych, nadmiernych przemieszczeń powierzchni terenu a nawet zagrozić realizacji samego procesu zgazowania.

Dla każdego geomechanika jest oczywiste, że jednym z najistotniejszych parametrów decydujących o stateczności wyrobisk podziemnych jest wytrzymałość skał otaczających, pozostająca w funkcji temperatury. W przypadku procesu zgazowania węgla zachodzącego w temperaturach ekstremalnych, bo dochodzących nawet do 1200° C, tego rodzaju zależność mając wyjątkowo duże znaczenie, jak do tej pory była rozpoznana tylko w sposób cząstkowy.

Wpisując się w wyżej zasygnalizowane zapotrzebowanie wielu gałęzi przemysłu, zwłaszcza wydobywczego i elektro-energetycznego, Doktorantka dokonała ogromnej pracy realizując systematyczne badania nad wpływem temperatury na wybrane parametry fizyczno-mechaniczne kilkudziesięciu serii skał karbońskich stanowiących potencjalne otoczenie geo-reaktorów podziemnego zgazowania węgla w GZW. Chodzi tu mianowicie o, zalegające w otoczeniu obecnie eksploatowanych pokładów węgla, łowce i piaskowce o różnym uziarnieniu, których przebadanie w tak szerokim zakresie stanowi wyjątkowe osiągnięcie Doktorantki w odniesieniu do obecnego stanu wiedzy w tym zakresie.

Z punktu widzenia oceny geomechanicznego zagrożenia procesu PZW, niezwykle istotna jest też niezawodna informacja o parametrach charakteryzujących wartości odkształcenia resztkowego (podkrytycznego) i jednocześnie resztkowych naprężeń, które pozwalają sformułować odpowiednie równanie konstytutywne zachowania się materiału skalnego pod obciążeniem. Badania Doktorantki wartości wspomnianych parametrów w temperaturach znacząco wyższych niż do tej pory rozpatrywanych, pozwoliły rozwinąć te zagadnienia w trzeci wymiar, umożliwiając w efekcie sformułowanie np. modeli sprężysto-plastycznych z osłabieniem dla zróżnicowanych wartości temperatury. Badania te niewątpliwie stanowią wyjątkowe i nowatorskie osiągnięcie Doktorantki umożliwiające w kolejnym etapie pracy wykorzystanie ich w racjonalnym modelowaniu numerycznym zachowania się górotworu w otoczeniu działającego geo-reaktora podziemnego zgazowania węgla.

Na tym też polega nowatorski charakter uzyskanych przez doktoranta wyników analiz.

3. Układ rozprawy doktorskiej

Zawartość recenzowanej dysertacji można podzielić na cztery podstawowe części:

- Część omawiającą wyniki studiów literaturowych w zakresie istniejącego stanu wiedzy w zakresie podziemnego zgazowania węgla oraz wpływu takiego procesu na temperaturę otaczającego górotworu i związane z tym zmiany własności fizyczno-mechanicznych masywu skalnego.
- Prezentację metodyki i wyników badań eksperymentalnych dotyczących własności fizycznych skał płonnych poddanych działaniu rosnącej do 1000°C (1200°C) temperatury, a w tym ocena

zmian makroskopowych, ubytku masy, zmian gęstości objętościowej, porowatości a także wartości współczynnika filtracji.

- Prezentację metodyki i wyników badań eksperymentalnych dotyczących własności mechanicznych skał płonnych poddanych działaniu rosnącej do 1000°C (1200°C) temperatury, a w tym ocena zmian ich odkształcalności i wytrzymałości z analizą niepewności pomiaru.
- Ilustrację możliwości zastosowania wyników pomiarów i ich analiz w przestrzennym modelowaniu numerycznym zachowania się górotworu w otoczeniu działającego podziemnego georeaktora.

Praca składa się z 11 rozdziałów obejmujących 27 podrozdziałów oraz ze spisów wykorzystanej literatury (99 pozycji), rysunków (120) i tabel (42).

Rozdział 1 – Wprowadzenie, cel naukowy i koncepcja badań – traktuje o zakresie prac zrealizowanym w dysertacji wraz z ich uzasadnieniem.

Rozdział 2 – Charakterystyka podjętego zagadnienia - przedstawia wyjątkowo obszernie stan wiedzy w zakresie podziemnego zgazowania węgla oraz dotychczasowych badań nad oddziaływaniem tego procesu na temperaturę górotworu, którego parametry fizyczne i mechaniczne z kolei zmieniają swoje wartości w odpowiedzi na ich wygrzewanie.

Rozdział 3 – Kryterium wyboru poligonów badawczych i skał w celu oceny zmiany ich właściwości w wyniku oddziaływania temperatur charakterystycznych dla procesu podziemnego zgazowania węgla – na wstępie omawia ogólnie geologię górotworu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, jednocześnie charakteryzując szczegółowo właściwości strukturalne i teksturalne utworów produkcyjnych karbonu. Wyboru poligonów badawczych (15), z których pobrano próbki skał, dokonano biorąc pod uwagę przede wszystkim potencjał ich lokalizacji w zakresie wykorzystania jako otoczenie podziemnych georeaktorów. Rozdział 3 podsumowuje także imponujący zakres analiz przeprowadzonych na próbkach iłowców (8 serii), piaskowców gruboziarnistych (4 serie), piaskowców średnioziarnistych (10 serii) i piaskowców drobnoziarnistych (9 serii). Ostatecznie Doktorantka wykonała 3420 analiz, z czego 2800 dotyczyło oznaczeń parametrów mechanicznych a 620 parametrów fizycznych i „hydrogeologicznych” w różnych warunkach temperaturowych.

Rozdział 4 – Wpływ temperatury na właściwości fizyczne sensu stricte skał górotworu karbońskiego – przedstawia bliżej metodykę prowadzenia badań nad zmianami właściwości fizycznych skał, takich jak masa i gęstość objętościowa, a także ich przemiany makroskopowe wskutek działania zróżnicowanych temperatur. Na podstawie wyników tych badań stwierdzono m.in., że największe ubytki masy są charakterystyczne dla zakresu temperatury 700°C÷1000°C i rosną w miarę

zmniejszania się średnicy miarodajnej uziarnienia materiału. Wykazano także, że zmiany gęstości objętościowej zachodzą podobnie dla przypadku łowców i piaskowców gruboziarnistych i drobnoziarnistych, natomiast dla przypadku piaskowców średnioziarnistych te zmiany są mniej jednoznaczne. Ponadto, badania laboratoryjne pozwoliły stwierdzić, że wartości zarówno porowatości jak i współczynnika filtracji badanych skał generalnie rosną wraz ze wzrostem temperatury.

Rozdział 5 – Wpływ temperatury na właściwości hydrogeologiczne skał płonnych górotworu karbońskiego – na wstępie wprowadza w dotychczasowy stan wiedzy i w standardową metodykę badań eksperymentalnych w zakresie własności hydrogeologicznych ośrodka skalnego, po czym z kolei przedstawia obszernie wyniki pomiarów porowatości i współczynnika filtracji skał płonnych poddanych wygrzewaniu w rozmaitych reżimach temperaturowych.

Wykazano, że wzrost temperatury do i powyżej 1000°C powoduje przyrost porowatości i wartości współczynnika filtracji badanych łowców i piaskowców, znacząco zróżnicowany w zależności od pochodzenia materiału skalnego.

Rozdział 6 – Współczynnik wpływu temperatury na właściwości geomechaniczne skał płonnych jako miara i prognoza ich zmian w wyniku procesu wygrzewania – wprowadza z kolei nowy parametr pod nazwą współczynnik wpływu temperatury na określoną cechę materiału powiązaną z jego właściwościami odkształceniowo-wytrzymałościowymi takimi jak: krytyczna i pokrytyczna (resztkowa) wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, moduł Younga i liczba Poissona, oraz odkształcenie resztkowe. Wyznaczone laboratoryjnie wartości tych współczynników mogą służyć do prognozy zachowania się skał płonnych – łowców i piaskowców - w otoczeniu georeaktora zgazowania.

Rozdział 7 – Wpływ temperatury na właściwości naprężeniowe skał płonnych górotworu karbońskiego - został poświęcony opisowi stosowanej metodyki i wynikom badań laboratoryjnych dotyczących wytrzymałości krytycznej R_c i wytrzymałości resztkowej R_{cr} na jednoosiowe ściskanie wybranych rodzajów skał płonnych. Badania przeprowadzone na grupach, wydzielonych wg kryteriów wytrzymałościowych (dla temp. 23°C), wykazały, że generalnie do około 600°C próbki skalne są mało wrażliwe na zmiany temperatury, natomiast temperatury wyższe prowadzą do znacznego spadku wytrzymałości, nawet po jej chwilowym wzroście w przypadku niektórych rodzajów skał. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane także do oszacowania niepewności pomiaru zarówno wytrzymałości krytycznej jak i resztkowej.

Rozdział 8 – Wpływ temperatury na sprężystość skał płonnych górotworu karbońskiego - - został poświęcony wynikom badań laboratoryjnych dotyczących „sprężystości” (a w zasadzie modułu sprężystości Younga) oznaczonej przy jednoosiowym ścisaniu wybranych rodzajów skał płonnych. Podobnie jak wyżej, badania przeprowadzone na grupach, wydzielonych wg kryteriów

wytrzymałościowych (dla temp. 23°C), wykazały, że generalnie do około 600°C odkształcalność próbek skalnych jest zauważalnie wrażliwa (zauważa się wzrosty i spadki) na zmiany temperatury, natomiast temperatury wyższe prowadzą do jednoznacznego wzrostu odkształcalności tj. generalnego spadku wartości modułu Younga. Uzyskane wyniki zostały również standardowo wykorzystane do oszacowania niepewności pomiaru zarówno wytrzymałości krytycznej jak i resztkowej.

Rozdział 9 – Wpływ temperatury na odkształcalność skał płonnych górotworu karbońskiego – informuje o wynikach badań laboratoryjnych dotyczących „odkształcalności” (a w zasadzie odkształcenia resztkowego) oznaczonej w stanie jednoosiowego ściskania wybranych skał płonnych górotworu karbońskiego. I tu również stwierdza się logiczną tendencję wzrostu tej cechy materiału w całym przedziale temperaturowym, chociaż w licznych przypadkach można napotkać swego rodzaju anomalie. Należy tu jednak zauważyć, że odkształcenie resztkowe jest parametrem nie do końca jasno sprecyzowanym i dlatego trudnym do jednoznacznej interpretacji.

Rozdział 10 – Zastosowanie wyników badań w praktyce górniczej – przedstawia próbę wykorzystania uzyskanych wartości współczynnika wpływu temperatury na określone parametry geomechaniczne górotworu do prognozy jego stateczności w otoczeniu potencjalnej lokalizacji reaktora PZW. Właściwie przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła wykazać, że uwzględnienie racjonalnych „termo-zmian” własności mechanicznych otoczenia reaktora ma znaczący wpływ na rozkład naprężeń i przemieszczeń w jego otoczeniu.

Rozdział 11 – Podsumowanie i wnioski – mieści w sobie podsumowanie wykonanych prac oraz ich wyników, z jednoczesnym uwypukleniem istotnych osiągnięć Doktorantki w tym zakresie.

4. Uwagi do pracy

Na początek tego rozdziału należy przywołać ustęp ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym...”, który wymaga aby rozprawa doktorska, stanowiąc oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, wykazywała jednocześnie ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w danej dyscyplinie naukowej oraz jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Analiza treści recenzowanej pracy pozwoliła mi w odniesieniu do wyżej przytoczonych wymagań stwierdzić co następuje:

A. W recenzowanej dysertacji przedstawiono udaną próbę powiązania zmian wartości temperatury (do nawet 1200oC) z wartościami podstawowych parametrów fizyko-mechanicznych (tj. przede wszystkim gęstości objętościowej, porowatości, współczynnika filtracji, krytycznej i resztkowej wytrzymałości na ściskanie w jednoosiowym stanie obciążenia, modułu sprężystości, resztkowego odkształcenia, itp.) skał płonnych, iłowców i piaskowców o różnym uziarnieniu,

zalegających w otoczeniu eksploatowanych obecnie pokładów węgla w różnych rejonach GZW. Badania laboratoryjne, będące źródłem danych dla dalszych uogólnień, przeprowadzono w wyjątkowo szerokim zakresie, w tej dziedzinie dotąd niespotykanym.

- B. Niewątpliwą nowością są wyniki badań dotyczące odkształcenia resztkowego i wytrzymałości resztkowej skał poddanych wygrzewaniu we względnie wysokich temperaturach towarzyszących podziemnemu zgazowaniu węgla.
- C. Wyniki badań Doktorantki wypełniły wartościową treścią dużą część „białych plam” w obszarach wiedzy związanej z nowymi technologiami, które aby były efektywne, muszą dysponować niezawodnymi informacjami.
- D. Wyjątkowo oryginalnym rozwiązaniem uzyskanym przez Doktorantkę jest wskazanie natychmiastowego kierunku wykorzystania otrzymanych wyników badań w praktyce górniczej. Temu służą przedstawione w rozdziale 10 wyniki modelowania numerycznego (MRSk, Flac3D) rozkładu naprężeń i przemieszczeń górotworu wokół georeaktora poddanego działaniu wysokich temperatur. Przeprowadzona analiza wykazała, że zmiany właściwości górotworu pozostające w funkcji temperatury zdecydowanie wpływają na rozkład naprężeń/odkształceń wokół reaktora i decydują o jego stateczności i efektywności całego procesu zgazowania.
- E. Rozprawa doktorska pod względem edytorskim ma charakter wzorcowy, a drobne błędy literowe są nieliczne (np. „zapieszczony” łożowiec, w podpisie do rys. 4.10) i w żaden sposób nie wpływają na jej ogólną wysoką ocenę.

Niezależnie od bardzo wysokiej oceny pracy, Recenzent zgłasza kilka uwag ogólnego charakteru, mających na celu udoskonalenie obecnej formy pracy doktorskiej:

- F. Jak wiadomo, najczęstszymi przyczynami powstawania błędów podczas empirycznego szacowania wartości określonych parametrów fizycznych jest zbyt szczupły zasób danych lub wykorzystywanie danych zawierających błędy w ocenie wartości. Biorąc pod uwagę, że przeprowadzono pomiar 7 parametrów geomechanicznych i fizycznych dla średnio 11,5 poziomów temperatury i dla 31 serii skał górotworu karbońskiego, imponująca liczba 3420 oznaczeń (in. wyników analiz) wykonanych przez Doktorantkę daje w bardzo grubej ocenie 1,37 analizy na jedno oznaczenie. Tego rodzaju proste wyliczenia uwiadcniają ogrom pracy, która stoi przed Doktorantką, jeśli założyć, że przynajmniej 4-6 analiz na jedno oznaczenie powinno się przeprowadzić, aby uzyskać względnie wiarygodne wyniki szacowania wartości określonego parametru. Można zatem przyjąć, że wykonana praca jest tylko dobrym początkiem i zapowiedzią dalszych pomiarów dla celów udokładnienia wiedzy o szukanych zależnościach.
- G. Należy zwrócić uwagę na to, że podane w rozdziale 10 zależności Hoek'a dotyczące obliczania parametrów geomechanicznych (równania 10.1÷10.5, str. 143) są jednym z kolejnych

propozycji („edycji”) ich szacowania^{1,2}, na podstawie wskaźnika GSI lub innych tego rodzaju względnie subiektywnych parametrów (np. współczynnik m_b). W przypadku wykonywania odpowiedzialnych predykcji zachowania się górotworu na podstawie teorii Hoeka-Browna, zalecić należy dużą ostrożność w tym zakresie i wykorzystywanie raczej podstawowych założeń teorii publikowanych w późniejszym okresie^{3,4}.

- H. Należy sprawdzić empirycznie czy parametry określone dla materiału wcześniej wygrzanego w wysokiej temperaturze i następnie schłodzonego do temperatury pokojowej (ok. 23°C) są takie same jak dla materiału pracującego w wysokiej temperaturze bez schładzania.
- I. Czytelnik może mieć trudności ze zrozumieniem skąd pochodzą parametry materiałów przyjęte do obliczeń numerycznych podane w tabeli 10.3.-10.5 i jak można je odnieść do informacji wcześniej podanych w rozdziale 10.
- J. Recenzent może mieć także wątpliwości co do proporcji wymiarów geogeneratora podanych na str. 142 (60x60x50 m), zwłaszcza po porównaniu ich z wizualizacją wyników obliczeń prezentowanych na rys. 10.11. Podana jako 50 m wysokość geogeneratora jest prawdopodobnie błędna.

5. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Anny Sygały pt. „Wpływ temperatury na właściwości skał w procesie podziemnego zgazowania węgla” stanowi oryginalny i szczególnie wartościowy wkład w rozwój wiedzy w obszarze górnictwa i geologii inżynierskiej. Wyjątkowo wartościowymi i oryginalnymi są uzyskane samodzielnie przez doktorantkę zależności pomiędzy parametrami fizyko-mechanicznymi wybranych rodzajów utworów geologicznych i temperaturą sięgająca nawet 1200°C oraz wykorzystanie tej wiedzy do predykcji zachowania się górotworu w otoczeniu hipotetycznego georeaktora. Opiniowana rozprawa ma zatem zarówno walory poznawcze, jak i charakter użyteczny, ponieważ jej wyniki mogą być w przyszłości wyjątkowo przydatne przy wyborze sposobów podziemnego zgazowania węgla kamiennego, zapobiegania awariom tego rodzaju urządzeń, a także przewidywania skał towarzyszącego im zagrożenia środowiskowego. Ponadto należy stwierdzić, że Doktorantka wykazała się przy tym odpowiednią znajomością aparatu matematycznego, opanowaniem warsztatu badawczego oraz zdolnościami do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych.

W związku z powyższym stwierdzam, że opiniowana rozprawa odpowiada wymogom stawianym w Ustawie z dn. 14.03.2003 r., o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595), co

¹ E. Hoek and E.T. Brown. Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 34, No 8, 1997, pages 1165-1186

² Hoek E. I P. Marinos. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks, No. 2. November 2007

³ V. Marinos, P. Marinos, E. Hoek The geological strength index: applications and limitations. Bull Eng Geol Environ (2005) 64: 55–65, DOI 10.1007/s10064-004-0270-5

⁴ Hoek E. Rock mass properties for underground mines. Published in Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. (Edited by W. A. Hustrulid and R. L. Bullock), Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME) 2001

Dr hab. inż. Witold Pytel, prof. PWr
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Politechniki Wrocławskiej
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

daje mi z kolei podstawę dla sformułowania wniosku do Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnictwa o dopuszczenie mgr inż. Anny Sygały do jej publicznej obrony. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.



Wrocław, 06-02-2015 r.