

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Roberta Hildebrandta**

p.t.:

„Kompleksowa metoda oceny skutków podziemnego zgazowania węgla”

Recenzję niniejszej pracy wykonano na zlecenie Rady Naukowej Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach z dnia 11.04.2017 stosownie do wymagań Ustawy z dnia 14 marca 2003r¹.

I. Ocena wyboru tematu pracy

Polityka energetyczna Unii Europejskiej promuje ograniczenia w emisji gazów cieplarnianych. Zmusza to przedsiębiorstwa górnicze do poszukiwania nowych metod pozyskiwania energii ze złóż węgla. Jednym ze sposobów z którym wiąże się duże nadzieje, jest zastosowanie podziemnego zgazowania węgla. Pomimo przeprowadzonych na świecie kilku prób zastosowania tej metody nadal pozostaje ona dla inżynierów górniczych dużą niewiadomą.

Swój koncept i zamierzenia Doktorant formułuje bardzo wyraźnie już na początku pracy. Wg mojej opinii temat podjętej rozprawy jest ciekawy zarówno z uwagi na małą ilość i dostępność przeprowadzonych badań, jak i na określenie najefektywniejszej metody pozwalającej określić wymiary i kształt kawerny po przeprowadzonym procesie zgazowania.

II. Ogólna charakterystyka konstrukcji i treści rozprawy.

Recenzowana praca doktorska, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Marian Turek, zawiera 136 stron tekstu zredagowanego w 12 rozdziałach wraz z podrozdziałami, w tym pisem 140 pozycji wykorzystanych materiałów źródłowych.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zagadnienia podziemnego zgazowania węgla. Doktorant przedstawia kluczowe zagadnienia związane ze zgazowaniem oraz możliwe problemy z jakimi musi poradzić sobie przedsiębiorca górniczy przed podjęciem decyzji o miejscu oraz możliwości przeprowadzenia procesu.

¹ Ustawa 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 wprowadzone ustawą z dnia 18 marca 2011r o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw (Dz. U. Nr 84, poz. 455) w brzmieniu obowiązującym od dnia 1 października 2011r.

W **rozdziale drugim** Autor przedstawia cel oraz zakres pracy, którym jest przeprowadzenie badań bezpośrednich wielkości pustki po przeprowadzonym procesie podziemnego zgazowania węgla (w skrócie PZW) oraz zasięgu i wpływu oddziaływania tego procesu na otaczający górotwór. Z uwagi na brak opracowanych kompleksowych metod pozwalających na te badania, autor podjął się trudnego zadania określenia odpowiedniej metody. Zadanie to doprowadziło Doktoranta do sformułowania celu nadrzędnego: „*Opracowanie metody badawczej do określenia parametrów geometrycznych kawerny powstałej w procesie podziemnego zgazowania węgla i oceny skutków procesu w pokładzie i warstwach towarzyszących.*”

Realizację tego zadania Doktorant przeprowadził na podstawie analizy wyników badań kawerny oraz masywu skalnego po przeprowadzonym procesie PZW w kopalni „Wieczorek”.

W **trzecim rozdziale** przedstawiono podstawowe informacje dotyczące stosowanych metod podziemnego zgazowania węgla. Doktorant szeroko opisał przebieg pracy georeaktora i związany z nim proces tworzenia się kawerny podziemnej. Opis ten oparł na dostępnej literaturze krajowej i światowej. W rozdziale na uwagę zasługuje szczególnie bardzo dokładny opis wielkości i kształtu kawern powstałych w wyniku prowadzonych w przeszłości procesów PZW oraz opis wpływu działania wysokich temperatur związanych z procesem zgazowania na skały otaczające, zmianę ich właściwości. Bardzo ważne jest określenie stanu naprężenia w skałach w rejonie powstałej kawerny podziemnej i oszacowanie stref zniszczenia (uplastycznienia, kruchego spękania). Wielkość stref zniszczenia ma istotny wpływ na stateczność górotworu w rejonie georeaktora, jego właściwy kształt. Możliwa utrata stateczności może doprowadzić do nieprawidłowości w procesie PZW, utraty kontroli nad procesem oraz znacznych deformacji w otoczeniu wyrobisk znajdujących się wewnątrz górotworu, jak i również deformacji powierzchni terenu.

Rozdział czwarty jest poświęcony opisowi warunków zrealizowanego eksperymentu (przy udziale Doktoranta) podziemnego zgazowania węgla w KWK „Wieczorek”. Doktorant przedstawił warunki górniczo-geologiczne rejonu prowadzonych badań, oraz szczegółową budowę podziemnego georeaktora. Sam proces zgazowania przebiegał w pięciu etapach trwających od 30 czerwca do 25 sierpnia. Po tym terminie z uwagi na bezpieczeństwo rejonu kopalni KWK „Wieczorek” przeprowadzono wygaszanie georeaktora.

W **rozdziale piątym** Autor przedstawił i scharakteryzował wybrane sposoby rozpoznania obszaru objętego wpływem podziemnego georeaktora na kopalni „Wieczorek”, uwzględniając warunki górniczo-geologiczne otaczających skał oraz konfigurację georeaktora, a następnie dokonał wyboru sposobu badania kawerny. W rozdziale Doktorant dokonał podziału na metody badawcze oraz zawierające się w nich techniki badawcze. Wśród metod badawczych, Autor wyróżnił metody górnicze oraz metody geofizyczne. Do pierwszej grupy zaliczył następujące inwazyjne metody badań: wykonanie wyrobiska górniczego, oraz wykonanie otworów badawczych. Do drugiej grupy zaliczył i opisał otworową metodę georadarową. Każdą z przedstawionych metod Doktorant scharakteryzował wymieniając jej wady i zalety w odniesieniu do możliwości stosowania w PZW. Następnie w kolejnym podrozdziale przedstawił opis proponowanych technik badawczych: badanie introskopowe otworów, skanowanie laserowe, oraz pomiary inklinometryczne otworów i dokonał oceny możliwości ich zastosowania do badań wygaszonego georeaktora.

W celu wyboru właściwej metody oraz techniki badań kawerny po przeprowadzonym w kopalni „Wieczorek” podziemnym zgazowaniu węgla Doktorant przeprowadził analizę

wielokryterialną (kryterium rezultatu, kosztów, ryzyka i czasu realizacji). W wyniku tej analizy wybrał otwory badawcze do prowadzenia badań kawerny powstałej po PZW.

Rozdział szósty stanowi opis przeprowadzonych pięciu wierceń badawczych do georeaktora zarówno z poziomu chodnika badawczego, jak również z powierzchni 7a/1, znajdującej się w pokładzie 510. Wiercenia te o średnicy 63,5mm przeprowadzono dla różnych długości otworu: od 45,5m do 62m. W kolejnym etapie wykonano w nich planowane badania. Doktorant opisał szczegółowo wszystkie przeprowadzone badania w otworach wiertniczych. Pierwsze badanie przeprowadzone zostało kamerą introskopową wraz z zapisem cyfrowym obrazu, następnie wykonano badanie trajektorii przebiegu otworów badawczych przy użyciu inklinometru. W dalszej kolejności przeprowadzono badanie geofizyczne otworów z użyciem georadaru otworowego, wykonując serię dwóch pomiarów przy tych samych parametrach impulsu fali elektromagnetycznej. Badanie przy użyciu skanera laserowego, które w dalszej kolejności zostało przez Doktoranta wykonane w otworach badawczych nie przyniosło spodziewanych rezultatów. Wynikało to z faktu, że powstała kawerna w pewnej części swojej objętości wypełniona była rumoszem skalnym, który mógł uszkodzić urządzenie badawcze. Ostatnim badaniem przeprowadzonym przez Doktoranta były badania rdzeni pobranych z otworów badawczych (badanie obejmowało węgiel w pokładzie 501, skały w stropie i spągu pokładu) oraz materiału z kawerny georeaktora. Na uwagę zasługuje pobieranie materiałów skalnych bezpośrednio z kawerny co stanowiło żmudną ale bardzo istotną pracę w celu zrozumienia procesów zachodzących podczas PZW. Z pomocą żerdzi strzelniczych wydobyto ok 100kg materiału wprost z wygaszonego georeaktora. Pozyskany materiał został w dalszej kolejności przygotowany do wykonania badań fizykochemicznych, mineralogicznych, oraz wytrzymałościowych.

W rozdziale siódmym Autor pracy przedstawił analizy wyników przeprowadzonych badań (opisanych szczegółowo w rozdziale poprzednim). Każde z wykonanych badań zostało przez Doktoranta bardzo dokładnie opisane i poparte odpowiednią dokumentacją fotograficzną oraz rysunkami i tabelami.

Pierwsze przeprowadzone badania przebiegu otworów badawczych pozwoliły na wstępne określenie obszaru procesu PZW (wg danych zamieszczonych przez Autora pracy, przebiegał on w otoczeniu otworu TZ-4243, gdzie zgazowaniu uległa warstwa pokładu węgla nad tym otworem).

Prowadzone w dalszej kolejności badania introskopowe wykazały, że wypełnienie pustki georeaktora stanowiły w większości skały z warstw stropowych zgazowanego pokładu, oraz że nie nastąpiło pełne podsadzenie stropu kawerny.

Dalsze badania dotyczyły określenia zmian parametrów fizykochemicznych skał pobranych z georeaktora (m.in. procentowej zawartości części lotnych w stanie suchym i bezpopiołowym: V^{daf} , oraz procentowej zawartości węgla w stanie suchym i bezpopiołowym: C^{daf}). Przeprowadzone przez Autora pracy porównania uzyskanych wyników z wynikami analiz pirolizowanych próbek węgla pobranych z rejonów nie objętych wpływami procesu PZW pozwoliły określić przedział temperatury w okolicy georeaktora. Temperatura w otworze TW- 4243 podczas procesu podziemnego zgazowania węgla (PZW) osiągnęła wartość ok 300°C, natomiast w części otworu TW-4245 urosła ona nawet do wartości z przedziału 700-1000°C. Na bazie pomiarów mineralogicznych materiałów z wnętrza kawerny określono maksymalną temperaturę powstałą w georeaktorze, która wyniosła 1360°C. Jak wykazały przeprowadzone przez Doktoranta badania wytrzymałościowe, dla warunków przeprowadzonej próby zgazowania w kopalni „Wieczorek”, temperatura georeaktora spowodowała spadek wytrzymałości skał stropowych pokładu węgla (piaskowca), natomiast skały znajdujące się wewnątrz kawerny wykazywały,

dużą rozbieżność badanych wartości wytrzymałości na ściskanie, który związany był z samym procesem PZW (etapów gazyfikacji, czasu oraz różnych wartości temperatur).

Przeprowadzone pomiary geofizyczne dla trzech otworów TW-4243, TW-4245 oraz TW-4246 potwierdziły wcześniejsze wnioski z przeprowadzonych badań, dodatkowo pomiar TW-4243 wskazał na powstanie kawerny w pokładzie węgla oraz spękań w warstwach stropowych pokładu. Doktorant na bazie przeprowadzonych analiz wyników badań wysnuł wniosek, że kawerna georeaktora PZW w KWK „Wieczorek”, rozprzestrzeniła się na odległość ok. 2 m za punkt połączenia otworów technologicznych.

W wyniku przeprowadzonych badań Autor pracy (dla wybranego rejonu kopalni Wieczorek gdzie przeprowadzano podziemne zgazowanie węgla) wyznaczył w górotworze współrzędne punktów, w których stwierdzono skutki działania PZW. Pozwoliło to odwzorować kształt i wymiar powstałej kawerny georeaktora. Kawerna objęła obszar w rejonie otworu technologicznego zasilającego w media zgazowujące na odcinku od stropu pokładu do punktu oddalonego o dwa metry od otworu TZ-4244. Doktorant przedstawił oszacowane wymiary kawerny, które wyniosły: długość ok. 32m, szerokość ok. 7m i wysokość ok. 5m.

W rozdziale ósmym Doktorant przedstawił opracowany przez siebie schemat badań w celu kompleksowej oceny skutków podziemnego zgazowania węgla. Jest to rozdział podsumowujący przeprowadzone analizy, w którym omawia On skuteczność przeprowadzonych badań, przedstawia zalecenia wynikające z przeprowadzonych badań, które są związane z analizą warunków górniczo-geologicznych występujących w rejonie przeznaczonym do zgazowania, konfiguracją otworów technologicznych georeaktora oraz zastosowaną technologią procesu zgazowania.

Zakończeniem prac jest **rozdział dziewiąty**, w którym zamieszczono wnioski wynikające ze zrealizowanych badań.

III. Ocena merytoryczna pracy.

Podjęty przez Doktoranta temat oceny skutków podziemnego zgazowania węgla jest problemem złożonym i bardzo trudnym. Do tej pory pomimo prawie stuletniej historii prowadzonych prób w niewielu przypadkach (w kraju i na świecie) podjęto się próby opisu tego zjawiska, jak i również ilościowego określenia wielkości powstałego zaburzenia wewnątrz górotworu. Jest to spowodowane zarówno kosztami takich badań, warunkami górniczo-geologicznymi oraz małą ilością wykonanych na świecie eksperymentów PZW (w porównaniu do innych technologii górniczych wykorzystywanych dla celów energetycznych). Nieliczne przykłady doświadczeń Autor pracy przytacza w rozdziale trzecim.

Recenzowana praca ma prawidłową konstrukcję i czytelny układ logiczny. Autor zapoznał się z wieloma dostępnymi wynikami przeprowadzonych doświadczeń z zakresu problematyki podziemnego zgazowania węgla, bazując zarówno na literaturze krajowej, jak i zagranicznej. Celem pracy jest stworzenie metodyki określania zmian w masywie skalnym w rejonie przeprowadzonego podziemnego zgazowania węgla. Doktorant przeprowadził rzeczową dyskusję na temat możliwości oraz skuteczności zastosowania poszczególnych metod i technik badawczych w warunkach polskiej kopalni węgla kamiennego „Wieczorek”. Te badania stanowią zasadniczy element prezentowanej rozprawy. Z szeregu przedstawionych metod oraz technik Doktorant za pomocą analizy wielokryterialnej wybrał te, które wg Niego wykazują się największą skutecznością (przy określonych warunkach). Mając świadomość skomplikowanej natury zagadnienia wynikającej ze zmian własności fizykomechanicznych oraz fizykochemicznych skał w rejonie PZW Autor pracy część badań

wykonał zarówno dla materiału pobranego z wnętrza georeaktora i skał otaczających, jak i również reprezentatywnego pakietu skał z poza rejonu objętego wpływem PZW. Wyniki badań uzyskane dla rejonu zaburzonego procesem zgazowania porównywane zostały z wynikami dla rejonu nienaruszonego, dając informację o wpływie procesu PZW na skały. Wykonane otwory wiertnicze i badania prowadzone w ich wnętrzu pozwoliły Doktorantowi na określenie kształtu oraz lokalizacji pustki po przeprowadzonym procesie zgazowania. Do zalet ocenianej pracy należy zaliczyć fakt, że Autor pracy swoje obserwacje przeprowadzone w warunkach naturalnych, związane z określeniem obszaru wpływów PZW: geodezyjne, introskopowe oraz geofizyczne, uzupełnił i częściowo potwierdził przeprowadzonymi badaniami laboratoryjnymi własności fizykochemicznych oraz wytrzymałościowych. Bazując na przeprowadzonych badaniach Doktorant przedstawił schemat postępowania w celu kompleksowej oceny skutków podziemnego zgazowania węgla.

Uważam, że wachlarz prac przeprowadzonych przez Doktoranta związanych z identyfikacją własności materiału skalnego oraz określenia gabarytów i lokalizacji kawerny po procesie PZW jest znaczący i wskazuje na dużą wiedzę oraz doświadczenie z zakresu szeroko rozumianego górnictwa.

Do oryginalnych i cennych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim połączenie metod i sformułowanie ogólnych wytycznych oraz warunków prowadzenia badań w celu oceny skutków podziemnego zgazowania węgla. Recenzowana praca zawiera wszystkie niezbędne elementy świadczące o umiejętności projektowania i realizowania pracy naukowej przez Kandydata, przy wykorzystaniu metodyki badań laboratoryjnych oraz in situ. Doktorant wykazał się dogłębną wiedzą z zakresu zrealizowanej przez siebie pracy oraz wysoką praktyką górnictwą. Warto także zwrócić uwagę na staranną szatę graficzną recenzowanej pracy. Układ tekstu jest przejrzysty, rysunki są jasne i czytelne. Lista literatury jak na mało rozpoznany temat jest dość bogata i obejmuje 140 pozycji krajowych i zagranicznych.

IV. Uwagi krytyczne

Podczas lektury pracy nasunęło mi się kilka uwag o charakterze merytorycznym oraz pytań, które zamieszczam poniżej. Ilość przedstawionych uwag merytorycznych i komentarzy świadczy o zainteresowaniu recenzenta tą problematyką i jego przekonaniu o celowości realizacji pracy, a także kontynuacji dalszych badań w tym zakresie.

Uwagi o charakterze merytorycznym:

1. Kompleksowa ocena skutków podziemnego zgazowania węgla powinna wg recenzenta zawierać szerszą analizę geomechaniczną (uwzględniającą warunki górnictwo-geologiczne), a nie ograniczającą się jedynie do przeprowadzonych badań laboratoryjnych dla 25 próbek skalnych nieobjętych wpływem PZW i 26 próbek skalnych objętych wpływem PZW. Dodatkowo, przeprowadzony opis badań wytrzymałościowych powinien zawierać dokładną informację o lokalizacji pozyskanych rdzeni, określoną wartość RQD, opis geologiczny badanego piaskowca, itp.
2. Z przeprowadzonych badań geofizycznych wynika, że dla otworu TW – 4246 spękanie skał spągowych (7,5m pakiet iłowca) nastąpiło na długości otworu od ok. 30 do 44m czyli ok. 14m. Niestety wyniki te nie zostały potwierdzone badaniami w dwóch innych otworach TW – 4243 i TW – 4245. A byłoby to ciekawe z uwagi na potwierdzenie obserwacji Chmury i Chudka, którzy twierdzą że dla iłowców odległość oddziaływania wynosi ok. 20m.

3. W opisie brakuje informacji o zasięgu spękania w stropie. Autor pracy podaje jedynie że: strefa spękań objęła w większości węgiel w stropie zgazowanego pokładu. Natomiast przy oszacowaniu wysokości komory (5m) i śr. grubości pokładu 501 (5,2m) istnieje duże prawdopodobieństwo, że strop charakteryzujący się dużą zmiennością (piaskowiec, mułowiec, ilowiec) uległ wyraźnemu spękaniu.
4. Autor pracy słusznie uważa, że prace badawcze powinny być prowadzone w odpowiedniej kolejności z uwagi na postępujące z czasem deformacje otworów badawczych. Jednak nie precyzuje tej kolejności.
5. Z uwagi na prowadzone badania ich cel i bezpieczeństwo Doktorant stwierdza że badania niszczące strukturę skały powinny być wykonane na końcu. Jest to celna uwaga, jednak prezentowane w pracy badania in situ nie powodują w szerokim zakresie naruszenia struktury skał. Dlatego wydaje się sensowne aby Autor pracy sprecyzował jakie przeprowadzone przez niego badania zalicza do grupy „naruszających strukturę skały”.
6. Skała pobrana z georeaktora została poddana badaniom fizykochemicznym, następnie ich wyniki porównano do wyników przeprowadzonych badań próbek węgla poddanych pyrolizie (dla zakresu temperatury od 100°C do 1000°C, prędkości nagrzewania 20°C/min i czasu trwania pyrolizy 60min). Wg recenzenta porównanie tych wartości stanowi duże uproszczenie i wnioski uzyskane na podstawie tych porównań powinny stanowić informację jakościową, nie ilościową.
7. W treści pracy Autor pracy przedstawił sposób badania kawerny za pomocą skanera laserowego, niestety pomimo prób badania tego nie udało się zrealizować (ze względu na stan otworów i kawerny). Czy nie należałoby zatem zrezygnować z tego typu badań w ocenie skutków PZW i dlaczego Doktorant metodę tą podaje we wnioskach jako sugerowaną i skuteczną.
8. Szkoda, że dla otworu TW – 4243 wykonanego w odległości ok 3m od kawerny georeaktora nie przeprowadzono badań geofizycznych przed procesem zgazowania, co pozwoliłoby porównać wyniki po zgazowaniu z wynikami przed zgazowaniem.
9. Recenzent jest świadomy że nie wszystkie badania, opisane w pracy, zostały przez Doktoranta wykonane samodzielnie. Część badań została wykonana pod kierownictwem Doktoranta, część przy jego udziale, a część została zlecona podmiotom zewnętrznym w ramach współpracy przy projekcie „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”. Dobrze byłoby opisać, które badania wykonane zostały samodzielnie a które pod Jego kierownictwem czy też przez podmioty zewnętrzne. Taki podział byłby czytelny a nie umniejsza wartości samej pracy, bowiem w pracy Doktorant wykazał się odpowiednimi umiejętnościami analizy otrzymanych wyników i potrafił je wykorzystać dla zrealizowania postawionej tezy w rozprawie doktorskiej.
10. Dyskusje jakie recenzent przeprowadził z Doktorantem pozwoliły wyjaśnić szereg drobniejszych uwag do pracy i z tego powodu nie zostały one tutaj zamieszczone.

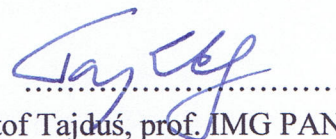
Pytania szczegółowe do Doktoranta:

1. Proszę o wytłumaczenie zdania ze strony 94 „zmiany węgla w spągu obejmują zasięgiem odcinek 0,5m”?
2. Jak były przygotowane próbki poddane badaniu wytrzymałościowemu, nie objęte wpływem PZW (czy były wygrzewane)?
3. Czy brak możliwości zagłębienia sondy w otworze wiązał się z jego zaciśnięciem w warstwach pokładowych, czyli zbyt późną próbą przeprowadzenia tego badania?

V. Wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska, pomimo kilku krytycznych uwag, jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego. Autor podjął w niej problem, który ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i praktycznego. Przeprowadzając swoje wywody wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy praktycznej i teoretycznej. Z tego powodu po przeprowadzeniu merytorycznej analizy i oceny pracy stwierdzam, że **mgr inż. Robert Hildebrandt** posiada umiejętność prowadzenia badań naukowych i rozwiązywania problemów ze szczególnym uwzględnieniem aspektów praktycznych efektów swoich dociekań. Zrealizował kolejny krok w kierunku zrozumienia zachowania się skał podczas procesu zgazowania węgla. Na podkreślenie zasługuje fakt oparcia się w pracy zarówno na wynikach pomiarów *in situ*, jak również wynikach laboratoryjnych.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska w pełni spełnia wymagania obowiązującej ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku. W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach o przyjęcie tej pracy jako pracy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Krzysztof Tajduś, prof. IMG PAN