

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**Doktoranta mgr inż. Rafała Skupio**

**pt.:**

**Zastosowanie nieinwazyjnych pomiarów rdzeni wiertniczych do zwiększenia informacji na temat parametrów skał zbiornikowych w celu wykorzystania ich do kompleksowej interpretacji i reinterpretacji danych z wybranych otworów**

### **1. PODSTAWA RECENZJI**

Podstawą przygotowania recenzji była decyzja Rady Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku” Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 28 czerwca 2021 r., o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Skupio pt. *Zastosowanie nieinwazyjnych pomiarów rdzeni wiertniczych do zwiększenia informacji na temat parametrów skał zbiornikowych w celu wykorzystania ich do kompleksowej interpretacji i reinterpretacji danych z wybranych otworów*. O decyzji Rady Dyscypliny Naukowej zostałam poinformowana w piśmie prof. dr hab. inż. Jacka Matyszkiewicza, z dnia 1 kwietnia 2021 r. znak WGGIOŚ-dz.0154-233/2021.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna (AGH), a promotorem pomocniczym dr inż. Marek Dohnalik (INiG- PIB).

Wraz z dokumentem przekazany został egzemplarz rozprawy doktorskiej.

### **2. CHARAKTERYSTYKA PRACY ORAZ UWAGI OGÓLNE**

Recenzowany maszynopis składa się ze streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim, spisu treści, 15 rozdziałów zawierających treści merytoryczne, zestawienia literatury i źródeł danych, spisu rysunków i tabel oraz spisu literatury. W tekście pracy zamieszczono 4 tabele i 58 rysunki. Zestawienie literatury, na którą powołuje się w swojej pracy Doktorant zawiera 101 pozycji, oraz 12 adresów stron internetowych. Należy podkreślić, że wykorzystana w pracy literatura to zarówno pozycje, które można określić jako

„historyczne”, ważne dla badaczy, jak i najnowsze publikacje prac prowadzonych w kraju i za granicą.

Praca liczy łącznie 169 stron. Bogaty materiał graficzny (rysunki, wykresy) ułatwia czytanie pracy i analizowanie rozległego materiału badawczego i dyskusji uzyskanych wyników.

Zastrzeżeń nie budzi także struktura pracy. Co prawda, Doktorant we Wprowadzeniu, deklaruje, że praca została podzielona na 4 rozdziały, dotyczące metodyki badawczej, prezentacji wyników, propozycji systemu badań oraz kompleksowej interpretacji danych dla wybranych otworów. Natomiast zamieszczony w rozprawie spis treści składa się z 15 rozdziałów, spisu tabel i rysunków oraz spisu literatury. Dla spójności z zamieszczonym spisem treści, powinno być raczej napisane, że „pracę składającą się z 15 rozdziałów, można podzielić na cztery zasadnicze części”.

We Wstępie (rozdział 1.) Doktorant przedstawia swoje przemyślenia dotyczące nieinwazyjnych metod pomiarowych w badaniach rdzeni wiertniczych, zaangażowanie w działania, które doprowadziły go do podjęcia studiów doktoranckich i realizacji doktoratu w ramach pierwszej edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Doktorant uzasadnia potrzebę podjęcia prac, mających na celu wprowadzenie oszczędności i optymalizacji planowania badań rdzeni archiwalnych, w celu uzyskania nowych informacji dotyczących złóż, będących przedmiotem zainteresowania firm naftowych.

We wprowadzeniu (1.1.) Doktorant krótko przedstawia strukturę pracy i najważniejsze, według niego, elementy poszczególnych części pracy. Podkreśla fakt, że do badań wykorzystane zostały nowoczesne metody badawcze i pomiarowe oraz wykorzystano w sposób niestandardowy nowoczesny tomograf medyczny. Lista tez pracy (1.2.) w mojej opinii mogłaby być nieco bardziej syntetyczna. Według mnie Doktorant niepotrzebnie sformułował podpunkty 2.1 i 2.2, które zawierają informacje niewymagające dowodzenia. W punkcie 2.2. sugeruję zastąpienie wyrażenia „kryształ scyntylicyjny” na „detektor scyntylicyjny”.

W rozdziale 2 Doktorant opisuje materiał badawczy, który stanowią przede wszystkim rdzenie wiertnicze, oraz zakres badań, wykonywanych na poszczególnych rdzeniach i obiektach (m.in. zwiercinach).

Rozdział 3 to ogólny opis aparatury badawczej i stosowanych metod badawczych. Na podkreślenie zasługuje stwierdzenie, że część procedur pomiarowych oraz metod badawczych

została opracowana przez Doktoranta w trakcie realizacji niniejszej pracy. Najistotniejsze wg Doktoranta to pomiary z wykorzystaniem metody XRF, dające informację o składzie chemicznym skał, pomiary z wykorzystaniem spektrometrii promieniowania gamma oraz badania z wykorzystaniem tomografii komputerowej, pozwalające na wizualizację struktury wewnętrznej rdzeni. Kolejny rozdział (rozdział 4) poświęcony jest zagadnieniom promieniotwórczości naturalnej i metodom pomiaru zawartości nuklidów promieniotwórczych w skałach. Omawiając pomiary gamma stosowane w geofizyce wiertniczej Doktorant pisze, że wyniki pomiarów z wykorzystaniem poszczególnych metod „powinny być takie same, pomimo odmiennych warunków środowiskowych”. Sugeruję, by pisać raczej „porównywalne”, niż „takie same”. Wyniki pomiarów z wykorzystaniem każdej z metod obciążone mogą być różnymi niepewnościami, co może spowodować pewne różnice wyników. Opisując podstawy fizyczne metody pomiarowej, Doktorant dokonał pewnych uproszczeń i skrótów, zwłaszcza w akapicie dotyczącym efektów zjawisk Comptona, efektu fotoelektrycznego i zjawiska tworzenia par. W przypadku przyszłych publikacji sugeruję przeredagowanie tego fragmentu. Również pewne niejasności znajduję w akapicie opisującym sposób obliczania stężenia nuklidów promieniotwórczych w badanym materiale. Doktorant pisze, że podstawowa analiza ilościowa i jakościowa odbywa się na podstawie okien energetycznych, obejmujących widma, w okolicach charakterystycznych energii – dla uranu jest to linia  $^{214}\text{Bi}$ , 1,76 MeV, a dla toru linia  $^{208}\text{Tl}$ , 2,63 MeV. Czy Doktorant jest pewien, że można założyć istnienie równowagi promieniotwórczej między uranem, a bizmutem  $^{214}\text{Bi}$  oraz torem, a talem  $^{208}\text{Tl}$ ? Na podstawie analizy pomiarów próbek środowiskowych, oraz zgodnie z doniesieniami literaturowymi twierdzi się, że szczególnie dla szeregu uranu  $^{238}\text{U}$  nie jest zachowana równowaga promieniotwórcza pomiędzy poszczególnymi elementami łańcucha promieniotwórczego. W środowisku, w wyniku różnych zjawisk fizycznych i chemicznych któryś z elementów szeregu może być selektywnie np. wymywany czy przenoszony. Brak równowagi promieniotwórczej pomiędzy uranem, a pozostałymi elementami szeregu promieniotwórczego może powodować błędne szacowanie jego stężenia promieniotwórczego w badanych próbkach. Również w przypadku toru i talu  $^{208}\text{Tl}$  równowaga promieniotwórcza może być zaburzona (IAEA-TECDOC-1363, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA, Viena, 2003). W tym samym akapicie sugeruję wyrażenia „...błąd towarzyszący analizie...” zamienić na „...niepewność...”.

W podrozdziale 4.2 w części dotyczącej definicji sugeruję poprawić stosowane słownictwo, np. „kwanty promieniowania gamma” emitowane przez źródło i padające na

detektor, w miejsce „cząstek” lub „cząsteczek”. W opisie spektrometru promieniowania gamma typu MAZAR, Doktorant wprowadził określenie „kanał” w miejsce wcześniej stosowanego „okna energetycznego”. Należałoby ujednoczyć nazewnictwo, sugerując pozostanie przy „oknach”. Powtórnie pojawia się problem dotyczący równowagi promieniotwórczej między poszczególnymi elementami szeregów promieniotwórczych.

W następnych rozdziałach Doktorant wyczerpująco opisuje kolejne stosowane metody: gamma-gamma do pomiarów gęstości objętościowej skał (rozdział 5), spektrometrię fluorescencji rentgenowskiej XRF wraz ze stosowaną aparaturą pomiarową (rozdział 6). W tabeli nr 6.3.3.1. w wierszu 3, w zestawieniu mierzonych pierwiastków przekreślono kilkanaście z nich. Proszę przed ewentualnymi publikacjami dokonać poprawy. Również rozdział 7 zawiera opis kolejnej metody, mianowicie komputerowej tomografii komputerowej. Jak podkreślono w tekście, metoda daje szczegółową informację o gęstości i strukturze rdzenia.

Kolejne rozdziały (rozdział 8 i 9) Doktorant poświęcił w całości prezentacji możliwości zastosowania urządzeń i metod badawczych opisywanych we wcześniejszych rozdziałach. Badania wykonano na wytypowanych przez Doktoranta rdzeniach skał łupkowych, piaskowcowych i heterolitowych. Wyniki ciągłych pomiarów rdzeni na tle profilowania otworowego oraz wyniki punktowych pomiarów laboratoryjnych prezentowane są na kolejnych rysunkach. Materiał ilustracyjny ułatwia podążanie za opisami interpretacji wyników uzyskanych z poszczególnych metod pomiarowych. W celu dokładniejszej analizy i porównania wyników z badań, Doktorant zmieścił w pracy szereg wykresów korelacyjnych dla pomiarów otworowych i pomiarów rdzeni oraz dla pomiarów rdzeni i pomiarów laboratoryjnych. Doktorant analizuje korelację pomiędzy różnymi mierzonymi parametrami. Obiecująco przedstawia się na przykład korelacja pomiędzy wyznaczoną zawartością uranu w skałach (wyrażona w ppm) i zawartością węgla organicznego TOC. Jednak mała liczba danych, jak podkreśla autor, obniża wiarygodność korelacji. Interesujące są również komentarze Doktoranta dotyczące pomiarów promieniowania gamma, uświadamiają skalę trudności zarówno pomiaru, jak i interpretacji wyników geofizycznych i pomiarów wykonanych z wykorzystaniem aparatury GLGT. Trudności pomiarowe pojawiają się szczególnie w przypadku badania skał o niskiej zawartości nuklidów promieniotwórczych, np. piaskowców.

Bardzo interesujący w mojej ocenie rozdział 10, poświęcony jest badaniom chemicznym XRF na rdzeniach wiertniczych i próbkach okruchowych z wybranych otworów. Badania te są złożone, wymagają przemyślanego przygotowania planu badań. Co więcej

niezbędna jest kalibracja wyników w obszarach występowania większej liczby otworów. Konieczność kalibracji wynika ze specyfiki środowiska geologicznego – jego niejednorodności i zmienności. Modele mineralogiczno-chemiczne, wykorzystujące skalibrowane wyniki badań, pozwalają na uzyskanie wiarygodnych interpretacji dla całych złóż, będących obiektem zainteresowania. W kolejnych podrozdziałach Doktorant przedstawia kalibracje wyników XRF oraz przeprowadza interpretacje litologiczne na podstawie badań XRF. Tworzenie modeli mineralogiczno-chemicznych, wybór składników mineralogicznych, dokonywanie bieżących korekt danych, stosowanych w algorytmach obliczeniowych wymagają doświadczenia i wiedzy z zakresu geologii złóż, mineralogii, geochemii i in. Doktorant z powodzeniem podjął się zarówno tworzenia wykresów korelacyjnych, jak i budowania modeli mineralogiczno-chemicznych. Na podstawie pomiarów XRF wykonana została interpretacja litologiczna dla wybranych rdzeni (czy ich fragmentów) wiertniczych, które przewiercały utwory piaskowcowe czerwonego spągowca, czy warstwy heterolitowe. W wyniku przeprowadzonej interpretacji litologicznej, z dużą dokładnością wydzielono wkładki piaskowców. Wszystkie działania przedstawione w omawianym rozdziale mają wysoką wartość użyteczną – pozwalają na uzyskanie coraz bardziej dokładnego obrazu środowiska geologicznego.

Kolejny rozdział nr 12 Doktorant poświęcił badaniom z zastosowaniem tomografii komputerowej i pomiarom gęstości metodą gamma-gamma. Zamieszczone rysunki i wykresy prezentują obraz struktury wewnętrznej badanych rdzeni i zmiany ich gęstości radiologicznej. Przeprowadzone badania z zastosowaniem różnych metod dały podstawę do stworzenia systemu pomiarowo - interpretacyjnego. Zdobyte doświadczenia, wnioski z uzyskanych wyników w trakcie realizacji pracy, pozwoliły Doktorantowi na opracowanie „trybu postępowania”, czyli zestawu działań, od planowania badań do uzyskania końcowej interpretacji wyników. Zdaniem Doktoranta zaproponowany sposób postępowania, a szczególnie zachowanie właściwej (logicznej) kolejności badań, wykorzystywanie najwłaściwszych metod, pozwoli na rzetelną interpretację uzyskiwanych wyników. Doktorant proponuje ponadto zestaw kroków, jakie należy wykonać podczas interpretacji wyników badań, uzyskanych z wykorzystaniem poszczególnych, możliwych do zastosowania metod. Obydwa zestawienia (instrukcje) mają dużą wartość użyteczną, z pewnością pozwolą na uniknięcie błędów przez osoby o mniejszym doświadczeniu. Pozwolą na szybsze i bardziej efektywne planowanie badań oraz dostosowywania ich do nowych warunków pomiarowych.

W rozdziale 13 Doktorant przedstawia opracowaną przez siebie kompleksową interpretację profilowań rdzeni wiertniczych. Działanie to ma na celu porównanie i uzupełnienie wyników z zastosowanych metod oraz ocenę ich jakości. Doktorant przedstawił przykłady korzyści, wynikających z właściwej interpretacji wyników badań rdzeni wiertniczych. Dane uzyskane w procesie interpretacji litologicznej pomiarów składu chemicznego XRF zostały wykorzystane do realizacji procedury korekty trajektorii nowo wierconego otworu horyzontalnego. Tego typu możliwości działania mają ogromny potencjał aplikacyjny.

Podsumowanie i wnioski zawarte zostały w rozdziale 14, w którym Doktorant przywołuje metody, które zostały wykorzystane w pracy i formułuje wnioski. W mojej opinii wnioski są zbyt szczegółowe, niełatwo dokonać oceny ich istotności i wagi. Niemniej rzetelnie odnoszą się do wszystkich etapów pracy i dowodzą postawionych tez.

### 3. UWAGI DYSKUSYJNE

Poniżej przedstawiam uwagi dyskusyjne, na które oczekuję odpowiedzi w czasie publicznej obrony rozprawy doktorskiej:

- Proszę o komentarz dotyczący pomiarów spektrometrycznych z wykorzystaniem spektrometru MAZAR. Czy zakłada Pan równowagę promieniotwórczą pomiędzy uranem i torem, a kolejnymi elementami ich szeregów promieniotwórczych? Czy chodzi o równowagę pomiędzy uranem, a  $^{214}\text{Bi}$  (str.24), czy pomiędzy  $^{226}\text{Ra}$ , a  $^{214}\text{Bi}$  (str. 36)?
- We wniosku nr 6 Doktorant zwraca uwagę na fakt, że obecność monacytu sprawia, że zmierzona koncentracja potasu i toru jest podwyższona, co w takich przypadkach nie koreluje się z poziomem zailenia. W jaki sposób unika się błędnych interpretacji poziomu zailenia? Czy tylko dzięki analizie wyników laboratoryjnych pomiarów XRD?
- Czy Doktorant potrafi zgrubnie oszacować rachunek finansowych zysków i strat, wynikających z wykorzystania nowoczesnych i wyrafinowanych metod badawczych, takich jak na przykład obrazowanie struktury rdzeni z wykorzystaniem tomografii komputerowej? Czy niewykorzystanie możliwości, jakie dają nowoczesne metody badawcze może wydłużać, komplikować i w rezultacie podwyższać koszty realizacji odwiertów?

### ***Uwagi o charakterze edytorskim.***

Doktorant nie ustrzegł się błędów redakcyjnych, które oczywiście nie wpływają na ogólną wysoką ocenę pracy. Na przykład wymiennie stosowane są określenia „niska/wysoka radioaktywność”, „intensywność naturalnej promieniotwórczości”, czy „intensywność tła”. Nie w każdym przypadku są to określenia, czy terminy formalnie funkcjonujące w ochronie radiologicznej, czy szerzej – w fizyce jądrowej. Nie w każdym przypadku prawidłowo używane jest pojęcie „nuklid” i „izotop”. Przed publikacją pracy sugeruję ponadto zwrócić uwagę drobne niezręczności językowe (np. kolokwializmy) i powtórzenia, o których osobiście poinformuję doktoranta.

### **4. WARTOŚCI POZNAWCZE PRACY**

Do wartości naukowych i aplikacyjnych pracy zaliczam przede wszystkim wykorzystanie właściwych i nowoczesnych metod pomiarowych i badawczych, zastosowanych w celu interpretacji i reinterpretacji danych pomiarowych z wybranych otworów. Doktorant wykorzystał szeroką gamę możliwości, jakie daje praca w terenie (pomiar *in situ*). Prawidłowo wykorzystał wyniki prowadzonych pomiarów. Pobrane w terenie próbki (rdzenie, fragmenty rdzeni, zwierciny, próbki okruchowe) poddane zostały badaniom laboratoryjnym z wykorzystaniem nowoczesnych urządzeń pomiarowych, właściwie dobranym do specyficznych rdzeni wiertniczych. Doktorant wnikliwie i krytycznie porównywał i korelował wyniki pomiarów wybranych parametrów, uzyskiwanych z wykorzystaniem różnych metod. Szczególnym wyzwaniem dla Doktoranta było przeprowadzenie badań rdzenie archiwalnych, często zniszczonych, z wieloma ubytkami, czy nierówną powierzchnią. Również w tym przypadku Doktorant umiejętnie wybierał materiał do badań, które realizował z wykorzystaniem nowoczesnych metod. Dzięki temu możliwe było uzyskanie nowych informacji, niedostępnych w ubiegłych latach, skalibrowanie i uzupełnienie wyników archiwalnych, a w rezultacie poszerzenie wiedzy o środowisku geologicznym analizowanego rejonu, a w szczególności na temat parametrów skał zbiornikowych. Bardzo ważnym osiągnięciem pracy jest opracowanie modeli mineralogiczno-chemicznych, wraz z algorytmami obliczeniowymi, które poprawiają interpretację litologiczną. Wykorzystanie interpretacji litologicznych na podstawie badań XRF, znacznie poprawia rozdzielczość i pozwala na określenie szerszego zakresu składników budujących skały. Na szczególne podkreślenie zasługuje opisana przez Doktoranta możliwość

wykorzystania wyników badań referencyjnych, pozwalających na stosowanie pomiarów XRF w procesie kierowania trajektorią otworu. Większość rozwiązań i schematów postępowania w trakcie procesu badania rdzeni oraz interpretacji wyników badań mają potencjał aplikacyjny, lub więcej, są gotowe do wdrożenia. Jak pisze Doktorant, część opracowanych metod została już wdrożona i umożliwiła wykonanie badań przemysłowych. Firmy naftowe i przedsiębiorstwa wiertnicze, wspomagane opracowanymi przez Doktoranta metodami, mają szansę na uzyskanie narzędzi, pozwalających na wybór optymalnego zestawu badań, dostosowanego do rozwiązywania problemów w konkretnym otworze wiertniczym.

## 5. WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa **mgr inż. Rafała Skupio** pt. *Zastosowanie nieinwazyjnych pomiarów rdzeni wiertniczych do zwiększenia informacji na temat parametrów skał zbiornikowych w celu wykorzystania ich do kompleksowej interpretacji i reinterpretacji danych z wybranych otworów*, ma charakter poznawczy i użyteczny, stanowi kompleksowy i oryginalny sposób realizacji założeń rozprawy, co potwierdza, że Autor posiada pełne umiejętności samodzielnego wykonywania pracy naukowej i spełnia wymogi stawiane dysertacjom doktorskim. Doktorant w sposób prawidłowy dokonał wyboru metod badawczych i analitycznych. Należy podkreślić wartość użyteczną pracy i jej ogromny potencjał wdrożeniowy.

Mgr inż. Rafał Skupio udowodnił zatem swoje kompetencje w zakresie formułowania celów badawczych, organizacji prac i badań naukowych, korzystania z nowoczesnych metod pomiarowych, krytycznego wykorzystywania danych własnych i archiwalnych, oraz właściwej interpretacji i dyskusji końcowych wyników badań. **Mając to na uwadze, w mojej opinii recenzowana praca odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w Ustawie z dnia 20.07.2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018r., poz. 1668, z późn. zm.) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Rafała Skupio do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku” Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.**

KIEROWNIK  
Instytutu Geologii Radiometry Środowiskowej  
Prof. Marii Goepfert Mayer  
Głównego Instytutu Górniczego  
*Marysola*  
mgr inż. Małgorzata Wysocka, prof. GIG