

Dr hab. Andrzej Gąsiewicz, prof. nadzw. PIG-PIB  
Państwowy Instytut Geologiczny,  
00-975 Warszawa, ul. Rakowiecka 4

Milanówek, 30.08.2019 r.

#### Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Adama Fheeda pt. **„Ocena teksturalna i diagenetyczna  
cechsztyńskich skał węglanowych w świetle badań magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR)  
i metod towarzyszących”**

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Adama Fheeda została przygotowana w Katedrze Surowców Energetycznych na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH pod opieką p. dr hab. Anny Świerczewskiej, prof. n. AGH i promotora pomocniczego p. dr hab. Artura Krzyżaka. Badania prowadzone w ramach doktoratu były częściowo finansowane ze środków grantów Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, grantu dziekańskiego WGGiOŚ AGH oraz grantu Narodowego Centrum Nauki Preludium, kierowanego przez Doktoranta.

Jednymi z najważniejszych cech skalnych istotnych w poszukiwaniach węglowodorów są cechy petrofizyczne. Dla ich oceny niezbędna jest wiedza geologiczna sprowadzająca się m.in. do znajomości takich cech zrzębu skalnego jak rozwój facjalny i historia przemian diagenetycznych. Przepuszczalność i porowatość skał, jej forma są wyjątkowo znaczącymi czynnikami wpływającymi na potencjały akumulacyjny i migracyjny węglowodorów oraz efektywność ich pozyskiwania. Pomimo dekad intensywnych badań geologicznych mechanizmy sedymentacyjne i procesy diagenetyczne prowadzące do rozpoznania charakteru, genezy i rozkładu porowatości nie do końca są rozumiane i wymagają dalszych studiów. Po części wynika to z unikatowości procesów operujących w różnym czasie i w niepowtarzalnych środowiskach przestrzennych i o nie do końca rozpoznanych czynnikach wpływających na ich rozwój, a po części z mniejszego lub większego subiektywizmu w ocenie samych badaczy. Dlatego od dawna są podejmowane, i to na wielu polach geologii, próby zobiektywizowania cech skalnych poprzez wypracowywanie różnych metod niezależnych od naocznej obserwacji. Z drugiej zaś strony takie podejście przyczynia się do zmniejszenia kosztów prac analitycznych poprzez szybsze uzyskanie pełniejszej informacji. Na tym polu nowoczesna technika laboratoryjna staje się w wielu przypadkach bardzo pomocna i przynosi pozytywne efekty. Nic więc dziwnego, że w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania takimi metodami. Są one podejmowanymi przez wiodące zespoły badawcze w tej dziedzinie, co przejawia się wzrastającą liczbą publikacji wyników badań w ramach tej tematyki.

#### Treść rozprawy

W powyższym kontekście wybór tematyki doktoratu jest bardzo trafny. Złożone badania laboratoryjne, przeprowadzone przez p. mgr inż. Adama Fheeda w ramach jego przewodu doktorskiego, dotyczą ciągle bardzo aktualnej tematyki badawczej związanej z rozpoznawaniem cech teksturalnych i diagenetycznych skał węglanowych. Do identyfikacji jednostek teksturalnych (rodzajów wapieni w sensie klasyfikacji Dunhama, 1962) i cech diagenetycznych, w szczególności różnych typów porowatości. Doktorant zastosował magnetyczny rezonans jądrowy (NMR) i wsparł je metodami towarzyszącymi - mikrotomografią rentgenowską ( $\mu$ CT) i obrazowaniem tomograficznym (ZTE). Prace analityczne zostały wykonane przez Doktoranta osobiście z niewielką pomocą personelu laboratoryjnego.

Rozpoznanie cech teksturalnych i rodzajów porowatości stanowi dwa główne wątki merytoryczne przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej. Te dwa konteksty badawcze są, jak to

przedstawiono powyżej, ważne nie tylko ze względów poznawczych, ale przede wszystkim praktycznych. Wychodzą one naprzeciw ww. potrzebom ogólnym i łączą się ze światowym nurtem w geologii naftowej zmierzającym do doskonalenia metod efektywnej prospekcji węglowodorów. Zebrane wyniki uzupełniają istniejący dotychczasowy stan wiedzy światowej w tym zakresie.

Podjęte badania objęły utwory wapienia cechsztyńskiego występujące na wale wolsztyńskim w zachodniej części kraju. Obszar i przedmiot badawczy zostały dobrze wybrane i trzeba przyznać na korzyść doktoranta, że to trudny materiał ze względu na złożone procesy sedymentacyjne oraz zróżnicowane, a często intensywne zjawiska diagenetyczne jakie występują w tego typu utworach kopalnych. Od strony metodycznej zaś, i z tych samych powodów, doskonale nadają się do testowania możliwości metody NMR. Na rzecz tego Doktorant przeprowadził również rozległe badania sedymentologiczne, i w szczególności obserwacje procesów diagenetycznych. Miały one za zadanie przedstawienie nowych obserwacji ale przede wszystkim posłużyły weryfikacji prowadzonych prac laboratoryjnych. Potrzeba zastosowania użytych metod badawczych jest przekonująco uzasadniona przez Doktoranta, a ich przydatność dla celów petrofizycznych jednoznacznie wykazana.

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Adama Fheeda została przygotowana w formie spójnych merytorycznie trzech bloków tekstowych. Pierwszy (12 stron) stanowi część wstępną, która obejmuje stronę tytułową, wskazanie źródeł finansowania prac i pochodzenia materiału badawczego oraz wskazanie roli Doktoranta w prowadzonych pracach badawczych oraz stosowne oświadczenia Promotorów i Doktoranta, spis treści i Podziękowania, a także streszczenia w języku polskim i angielskim. W rozdziale wstępnym (Wstęp, 1 strona) Doktorant skrótowo przedstawia strukturę przedłożonej rozprawy i główne konteksty analityczne. Następnie omówił „Obiekt i cel pracy” (2 strony), w którym obok krótkiej charakterystyki geologicznej obszaru badań dobrze uzasadnił cel oraz metody podjętych prac tj. zastosowanie metody NMR i analiz petrofizycznych dla realizacji celu określonego tytułem rozprawy. Zakres zamierzonych prac (zadań) został ujęty w trzy hipotezy badawcze.

Dalsze człony rozprawy stanowią dwie powiązane ze sobą zasadnicze części merytoryczne. Część I przedstawia przedłożony przez Doktoranta obszerny (39 stron) tekst-komentarz lub opis dokonania badawczego, w którym referowane są dość szeroko główne wyniki przeprowadzonych prac analitycznych. Stanowi on bardzo dobrze napisany przewodnik po publikacjach stanowiących podstawę pracy załączonych w dalszej (drugiej) części rozprawy. Zostały one ujęte w osobne rozdziały stanowiące: wprowadzenie geologiczne (omawiające tło geologiczne, tj. krótką charakterystykę obszaru i przedmiotu badań), uzasadnienie podjętych prac, a następnie omówienie zastosowanych metod badawczych i rezultatów przeprowadzonych badań oraz ich dyskusję. W ostatnim rozdziale „Podsumowanie i wnioski” wypunktowane są najważniejsze wyniki prac analitycznych oraz przedstawione najważniejsze wnioski. Spis literatury obejmujący 79 pozycji, są to głównie prace oryginalne, kończy tę część pracy. Dobór cytowanej literatury świadczy o bardzo dobrej orientacji Autora w podjętej dziedzinie wiedzy. Warto podkreślić, że przedstawione wprowadzenie stanowi rozszerzenie i uzupełnienie załączonych publikacji, poprzez uwzględnienie wyników prac, które ukazały się poza formalnym zestawem prezentowanym w Części II rozprawy.

Część II rozprawy to główna część pracy doktorskiej stanowiąca spójny merytorycznie zestaw trzech artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach międzynarodowych. Jest on poprzedzony *Podsumowaniem* treści zawartych w załączonych artykułach (1 strona) i następnie *Wykazem bibliograficznym* załączonych artykułów oraz stosownymi oświadczeniami Promotora i Doktoranta oraz współautorów dotyczących określenia jego wkładu pracy oraz wykazu udziału innych osób w przygotowaniu materiału do publikacji i w pracach technicznych.

Wszystkie prace stanowiące podstawę rozprawy zostały opublikowane w latach 2017-2019, przeszły zatem proces recenzji i spełniły wysokie wymagania stawiane w renomowanych czasopismach międzynarodowych, zarówno co do poziomu merytorycznego, jak i językowego oraz edytorskiego. Wysoki poziom merytoryczny wszystkich trzech publikacji należy uznać zatem za potwierdzony.

Pierwsza publikacja (zał. I) jest opublikowana w *Journal of Petroleum Science and Engineering* (IF=2,886, a 5-letni = 3,157), druga (zał. II) w *Journal of Applied Geophysics* (CS=2,48), a trzecia (zał. III) jest opublikowana w rodzimym *Roczniku PTG* (IF= 1.234). Pierwsze dwie publikacje są wykonane we współautorstwie z Promotorem pomocniczym oraz z Promotorem

pomocniczym i Promotorką. W obydwu tych współautorskich pracach Doktorant jest głównym autorem, trzecia zaś publikacja jest jego samodzielną pracą. Warto w tym miejscu dodać, że wyniki prowadzonych prac przez Doktoranta były również częściowo przedstawione w wydanych 4 innych współautorskich artykułach naukowych spoza zestawu przedstawionego w ramach rozprawy doktorskiej. Na podkreślenie zasługuje udział i wystąpienia na konferencjach krajowych i międzynarodowych oraz uznanie za działalność badawczą w postaci licznych nagród i wyróżnień za osiągnięcia naukowe, prace dyplomowe, aktywność środowiskową i udział w programach i konkursach.

Pierwsza z publikacji (*A textural and diagenetic assessment of the Zechstein Limestone carbonates, Poland using the transverse Nuclear Magnetic resonance*, Zał. I) stanowiących podstawę doktoratu jest wykonana we współpracy z Promotorem pomocniczym. Praca ta, opublikowana w 2017 r., przedstawia bardzo ciekawie i kompetentnie zestawiony opis odmian teksturalnych badanych skał, identyfikację procesów diagenetycznych i omówienie wyników zastosowania metody niskopolewego NMR do wyróżnionych odmian teksturalnych badanych węglanów. Jak dotąd bowiem brak jest jasnych procedur wydzielenia porowatości typu *vug*. W wyniku badań stwierdzono, że duże trudności w identyfikacji tekstur osadowych węglanów są spowodowane intensywną cementacją. Autorzy wykazali, że rozmaite facje węglanowe (tekstury depozycyjne) mogą być wstępnie wyróżnione na podstawie kilku kryteriów. Uzyskane rezultaty wskazują, że opracowana – i co warto podkreślić nowa – metodologia rozpoznawania facji i przemian diagenetycznych zrębu węglanowego może być przydatna w praktyce.

Drugi artykuł (*Exploring a carbonate reef reservoir-nuclear magnetic resonance and computed microtomography confronted with narrow channel and fracture porosity*, Zał. II) opublikowany w 2018 r. wraz z udziałem promotorów, a zamieszczony w *Journal of Applied Geophysics*, dotyczy oceny cech teksturalnych w oparciu o metodę NMR. Doktorant był głównym autorem części analitycznej. Autorzy opracowali szybki sposób identyfikacji i charakterystyki wąskich kanałów porowych. Autorzy zaproponowali połączenie szybkiego wydzielenia porów z nie przetworzonych danych mikrotomografii rentgenowskiej ( $\mu$ CT) i obrazowania tomograficznego (ZTE). Podejście to okazało się przydatne do charakteryzowania i lokalizacji przestrzeni porowej, w szczególności wydłużonych (np. szczelin) i krętych, mniej regularnych pustek skalnych. Ponadto, umożliwiło ono ocenę rzeczywistego stopnia połączenia porów oraz ich możliwości akumulacji płynów złożowych, co jest bardzo istotne z punktu widzenia cech zbiornikowych zrębu skalnego. Jest to osiągnięcie autorskie.

Trzecia publikacja z 2019 r. (*The impact of fossils on diagenetically controlled reservoir quality: the Zechstein Brońsko Reef*, Zał. III), autorstwa jedynie Doktoranta ma klasyczny profil geologiczno-geofizyczny. Doktorant szczegółowo i w bardzo systematyczny sposób udokumentował i zinterpretował zręb facyjny oraz środowiska sedymentacji, a także rozwój diagenetyczny utworów wapienia cechsztyńskiego badanego obszaru. Autor skupił się w nim na relacjach między wykształceniem facyjnym, w szczególności na składzie faunistycznym, a rozwojem i wykształceniem porowatości i przepuszczalności w nawiązaniu do wyników eksperymentalnych osiągniętych za pomocą metody NMR (omówionych we wcześniejszych publikacjach). Jest to zagadnienie, jak dotychczas, słabo prezentowane lub pomijane w literaturze przedmiotu. Przedstawione wyniki analiz mają znaczenie w prospekcji węglowodorów. Przedstawiony tekst czyta się z przyjemnością.

#### **Uwagi do przedstawionej rozprawy**

Temat rozprawy doktorskiej jest jasno określony, choć mało precyzyjny. Według tytułu przedmiotem rozprawy jest ocena cechsztyńskich skał węglanowych. Można byłoby więc oczekiwać badań aż trzech poziomów węglanowych powstałych o różnych pozycjach stratygraficznych. Tymczasem omawiany jest wyłącznie jeden poziom węglanowy – wapienia cechsztyńskiego (Ca1), a warto dodać, że pozostałe dwa różnią się wyraźnie od pierwszego tak wykształceniem litofacyjnym jak również historią diagenetyczną, w tym charakterystyką porowatości. I druga kwestia to „ocena diagenetyczna”. To bardzo pojemny termin i kierujący uwagę na petrologię badanych utworów. Wydaje się, że lepszym terminem byłaby ocena petrofizyczna [w świetle podjętych badań magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) i innych metod], bo w istocie to jest sedno sprawy,

której autor poświęcił swoje badania. W tytule dodałbym też z jakiego obszaru pochodził materiał badawczy, a to ze względu na specyfikę wykształcenia Ca1 na wale wolsztyńskim, gdzie występują twory rafowe, nieobecne w innych regionach Nizy Polskiego.

Część pierwsza, wstępna, recenzowanej pracy doktorskiej p. mgr inż. Adama Fheeda ma trochę pogmatwaną konstrukcję. W przedstawionej postaci bowiem część wstępna oraz początkowe rozdziały części pierwszej merytorycznie się nakładają. W efekcie tego rozprawa zaczyna się od struktury przedstawionej rozprawy, a niektóre kwestie, np. cel pracy i uzasadnienie celu badań powtarzają się w odrębnych rozdziałach. Prostszy zabiegiem i łatwiejszym do przyswojenia dla czytelnika byłoby utrzymanie tradycyjnego podejścia, prezentowanego zresztą w pierwszej i trzeciej z załączonych publikacji, a sprowadzającego się do przedstawienia ogólnego zarysu problemu i w tym kontekście wyartykułowanie potrzeby/znaczenia podjętych prac, i w konsekwencji określenia celu badawczego.

Zdaniem recenzenta w części pierwszej rozprawy brakuje przedstawienia bądź krótkiej dyskusji o problemach klasyfikacji zarówno tekstur sedimentacyjnych jak i porowatości. Byłoby to dobre wprowadzenie w problem i pomogłoby szerzej uwypuklić potrzebę/kontekst podjętej problematyki badawczej.

Doktorant w autorskim komentarzu wskazuje nierzadko na ograniczenia stosowanej metody (NMR). Są one analizowane również we wspólnej publikacji z Promotorem pomocniczym (Zał. I). Niejednoznaczności niektórych parametrów metody mogą wg Autorów wynikać z obecności minerałów ilastych w próbkach. Są one związane ze stylolitami. Wydaje się że komplikacje może powodować również obecny w rdzeniach materiał płuczkowy. Ten aspekt materiału badawczego nie jest nigdzie komentowany. Podobnie przyjmuje się, że „dolomityzacja doprowadziła do wytworzenia się systemu porowatości międzykryształicznej, która dodatkowo komplikuje .. krzywe T2” (s.31). Wskazuje to na potrzebę rozważenia wpływu mikroporowatości materiału skalnego. Być może duża zmienność krzywej T2 widoczna w pakstonych jest właśnie efektem mikroporowatości? Problematyka ta zyskuje ostatnio mocno na popularności tak w pracach eksperymentalnych jak obserwacjach bezpośrednich. Jej obecność w węglanach cechsztyńskich jest powszechna.

Do dyskusyjnych kwestii geologicznych należy wiązanie (w komentarzu Doktoranta i załączonych publikacjach) procesów prowadzących do powstania porowatości typu „vug” pod wyłącznym wpływem wód meteorycznych w warunkach powierzchniowej i/lub przypowierzchniowej diagenety. Tymczasem część porów mogła powstać podczas głębszego pogrzebienia na skutek rozkładu materii organicznej i krążenia zakwaszonych wód w zrebie skalnym. Podobnie trudno uznać za prawdopodobną, przyjętą bezkrytycznie w rekonstrukcjach rozwoju sedimentacyjno-diagenetycznego wapienia cechsztyńskiego (zwłaszcza w Zał. III), tezę cyklicznego wpływu ruchów eustatycznych poziomu morza wywołaną zmianami glacialnymi. A z nimi jest wg Doktoranta wiązany rozwój porowatości badanej serii osadowej. Tymczasem większe pokrywy lądolodowe zanikły już po wczesnym permie (np. Frakes et al. 1994-*Climate Modes of the Phanerozoic*, Cambridge; Rees 2002, *Geology*, 30, Wopfner 2013 oraz Isbell 2012 w: Geological Society, London, Special Publication 376), a całkowicie 5-7 mln lat przed końcem permu (Link, 2009-*Encyclopedia of Paleoclimatology and ancient Environments*, Springer), a więc jeszcze przed cechsztyńskim. Cykliczność ta nie zaznacza się również na załączonych profilach lito-biofajalnych (Fig. 2 i 3).

Osobny problem stanowi nomenklatura, która jest ogólną bolączką polskiej geologii. Chodzi tu o używanie terminologii według anglosaskiej pisowni, bez polskich odpowiedników. W recenzowanej pracy odnosi się to do niektórych rodzajów porowatości – termin „vug” i tekstur depozycyjnych. O ile formalnie wprowadzono do literatury spolszczenia klasyfikacji węglanów wg Dunhama (Jaworowski, 1982, *Przegląd Geologiczny*), to w przypadku terminu „vug” rzeczywiście trudno znaleźć trafny odpowiednik w języku polskim, który okazuje się w tym przypadku być niezbyt giętki. Termin angielski „mold” – porowatość „moldyczna” można zastąpić np. porowatością poziomową, lub formową.

Generalnie zaś całość jest napisana językiem poprawnym, w sposób zwarty i przejrzysty. W wielu jednak miejscach tekst wymaga poprawy stylistycznej. Sformułowania takie np. jak: „wyróżnienie biofacji ... istotne [dla] ich kontrybucji w rozwoju przestrzeni porowej” (s. 14), „Szczeliny i kanały zostały wyekstrahowane z surowego obrazu” (s.24) czy „atrakcyjność petrofizyczna” (s.52) są niezręczne i ekscentryczne, a „dane surowe” (s.24) to dane nieprzetworzone, wyjściowe. Zapewne z tego samego powodu pojawiają się lapsusy, np. „zwracano uwagę na ... ziarna

obleczone (ooidy), onkoidy, kortoidy" (s.25), a przecież wszystkie wymienione należą do klasy ziaren obleczonych.

#### Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że moja ocena badań naukowych przeprowadzonych w ramach przewodu doktorskiego p. mgr inż. Adama Fheeda, przedstawionych w komentarzu do przeprowadzonych prac oraz w trzech publikacjach stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej jest zdecydowanie pozytywna. Wyrażone powyżej uwagi pod jej adresem mają charakter redakcyjny lub dyskusyjny i nie wpływają na ocenę merytoryczną dokonań. Doktorant podjął aktualną tematykę badawczą, wykazał kompetencję w prowadzeniu badań metodycznych z zastosowaniem zaawansowanych metodologii w analizie złożonego systemu sedymentacyjno-diagenetycznego wapienia cechsztyńskiego w celu rozpoznania jego głównych cech petrofizycznych. Doktorant wykazał się przy tym krytycznym oglądem stosowanych metod, wskazując ich zalety i wady. Widoczne duże zacięcie eksperymentalne dobrze rokuje, jako że w geologii, opartej w znacznym stopniu na subiektywnej ocenie i interpretacji badaczy, potrzeba dużo weryfikacji.

Wyniki pracy uważam za bardzo wartościowe i wnoszące istotny wkład metodyczny do rozwoju nauki w przedmiotowym zakresie. Sprowadza się on do przedstawienia propozycji wprowadzenia do praktyki petrofizycznej nowej metodyki identyfikacji facji skał węglanowych definiowanych wg będącej w powszechnym użyciu klasyfikacji skał węglanowych Dunhama (1962) w oparciu o wybrane parametry NMR. Są one pomocne przy projektowaniu prac poszukiwawczych za węglowodorami w tym regionie kraju i być może mają zastosowanie do innych sekwencji węglanowych na świecie.

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiony w publikacjach materiał badawczy spełnia przyjęte wymagania stawiane pracom doktorskim, jak i wymagania ustawowe określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki. Dlatego, wnioskuję o dopuszczenie p. mgr inż. Adama Fheeda do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny, nowatorstwo oraz imponujący zakres przeprowadzonych badań, a ponadto opublikowanie wyników badań w stosunkowo krótkim czasie po skończeniu studiów w wysoko notowanych czasopiśmie naukowych i – jak rejestruje *web of science* – cytowanie ich (dotyczy dwóch pierwszych pozycji – Zał. I i II z lat 2017 i 2018) w renomowanych czasopiśmie naukowych świadczą, że wyniki badań doktoranta zostały zauważone przez innych badaczy, co tym samym potwierdza ich wpływ na rozwój nauki w przedmiotowym zakresie, wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Adama Fheeda.

