

Prof. dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna
Katedra Geofizyki
Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie
e-mail: jarzyna @agh.edu.pl
tel. 12 617 24 21

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Tomasza TOPORA

pt. „Lower Silurian shales of the Baltic Basin (Poland): reservoir parameters and methane storage potential as a function of thermal maturity

(Dolnosylurskie łupki basenu bałtyckiego: parametry zbiornikowe i potencjał retencji metanu w funkcji dojrzałości termicznej)“

wykonana na zlecenie Dyrektora Instytutu Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk – prof. dr hab. Ewy Słaby z dnia 18 grudnia 2017r.

Informacje ogólne:

Rozprawa doktorska obejmuje spójny tematycznie cykl 3. artykułów naukowych, opublikowanych w indeksowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym; jedna praca (r. 2016) w czasopiśmie Fuel, dwie prace (r. 2017) w czasopiśmie International Journal of Coal Geology. Oba czasopisma znajdują się na liście A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z liczbą przyznanych punktów równą 40. Mają Impact Factor odpowiednio równy 4.601 i 7.783. Artykuły zostały opublikowane jako prace wieloautorskie, przy czym Doktorant jest pierwszym autorem każdej publikacji. Zgodnie z Art. 13 pkt.4 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (z późniejszymi zmianami) rozprawa stanowi samodzielną i wyodrębnioną część pracy zbiorowej, a wkład Doktoranta jest szczegółowo opisany i potwierdzony przez wszystkich współautorów. Doktorant jest przynajmniej w 70 % autorem koncepcji przeprowadzonych eksperymentów i wykonania pomiarów laboratoryjnych oraz interpretacji wyników (w przypadku pierwszego artykułu) oraz w 70 % autorem koncepcji dwóch pozostałych artykułów. W przypadku 2. pracy samodzielnie wybrał próbki, natomiast w 3. pracy sam wykonał mapy trendów zmienności różnych parametrów charakteryzujących potencjalne złoża łupków z gazem na obszarze polskiej części basenu bałtyckiego. Najmniejszy procentowy wkład pracy Doktoranta wyniósł 50% i dotyczył wyznaczenia pojemności kationowymiennej CEC w pierwszym artykule oraz oszacowania zasobów złóż gazu w łupkach z basenu bałtyckiego w artykule 3. Rozprawa doktorska zawiera obszernie streszczenia w językach polskim i angielskim i szczegółowy opis w języku polskim i angielskim, zatem spełnia wymagania Art. 13 pkt.6 wzmiankowanej ustawy. Wymienione artykuły zostały zamieszczone w pełnym brzmieniu jako załączniki w rozprawie doktorskiej.

Pracując nad rozprawą Doktorant postawił dwa cele oraz dwie hipotezy badawcze. Zasadniczym celem pracy było dostarczenie nowych informacji na temat parametrów zbiornikowych i potencjału retencji metanu dla dolnosylurskich łupków z polskiej części basenu bałtyckiego; drugim - wyznaczenie potencjalnych *sweet spot*ów i oszacowanie złóż gazu ziemnego w basenie bałtyckim. Doktorant przedstawił także pozytywną weryfikację pierwszej hipotezy, że „ewolucja mikro- i mezoporowatości z głębokością jest podyktowana zmianami zachodzącymi w trakcie dojrzenia materii organicznej” oraz drugiej hipotezy, że „materia organiczna i stopień jej dojrzałości termicznej odgrywają kluczową rolę w procesie sorpcji CH₄ w dolnosylurskich łupkach basenu bałtyckiego”. Doktorant w znacznym stopniu przyczynił się do opracowania nowej metody pomiaru porowatości skał łupkowych z gazem, którą następnie wykorzystał w swojej pracy badawczej.

Postawione i rozwiązane zadania zostały dokładnie przedstawione w 3. artykułach cyklu.

Omówienie treści rozprawy

W pierwszym artykule: Topór T., Derkowski A., Kuila U., Fischer T.B., McCarty D.K., 2016. Dual Liquid Porosimetry – porosity measurement technique for oil- and gas-bearing shales. *Fuel* 183, 537-549. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.102> opisano protokół stosowania i przedstawiono wyniki uzyskane z użyciem metody wyznaczania porowatości całkowitej oraz porowatości dostępnej dla ciekłych węglowodorów poprzez dwukrotny pomiar próbki zanurzonej w wodzie i nafcie. Jest to oryginalne rozwiązanie opracowane i wdrożone do pomiarów na próbkach skał łupkowych przez Doktoranta. W tym artykule opisano również sposób wyznaczenia zakresów porowatości nieefektywnej (objętości wody związanej). Z użyciem nowej metody przetestowano 135 próbek z basenu bałtyckiego i 45 próbek oligoceńskich łupków z basenu podhalańskiego. Wyniki pomiarów na obu zbiorach próbek pozwoliły potwierdzić spadek porowatości z głębokością i wzrostem stopnia dojrzałości termicznej materii organicznej w skałach. Pęcznienie próbek nasyconych wodą oraz ograniczenie nasycenia naftą uznano za główne przeszkody w uniwersalnym stosowaniu proponowanej metody. Stwierdzono, że pęcznienie próbek maleje ze wzrostem głębokości i stopnia dojrzałości materii organicznej, natomiast zwiększa się ze wzrostem zailenia. Niepełne nasycenie naftą wyjaśniono obecnością wody związanej, która może całkowicie wypełniać małe pory. Zakres zmian porowatości nieefektywnej oceniono na podstawie adsorpcji wody w warunkach 40 i 80 % wilgotności względnej. Połączenie dwóch pomiarów porowatości (próbki nasycone wodą i naftą) pozwoliło również na dokładne wyznaczenie gęstości ziarnowej i objętościowej próbek, zatem umożliwiło wyznaczenie porowatości wolnej od efektu pęcznienia skał.

W drugiej pracy: Topór T., Derkowski A., Ziemiański P., Szczurowski J., McCarty D.K., 2017b. The effect of organic matter maturation and porosity evolution on methane storage potential in the Baltic Basin (Poland) shale-gas reservoir. *International Journal of Coal Geology* 180, 46-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.07.005> potwierdzono hipotezę dotyczącą związku zmian mikro- i mezoporowatości z głębokością i ze zmianami zachodzącymi w dojrzewającej materii organicznej. Stwierdzono, że zawartość materii organicznej i stopień jej dojrzałości termicznej odgrywa znaczącą rolę w procesie sorpcji metanu w dolnosylurskich łupkach polskiej części basenu bałtyckiego. Eksperymenty przeprowadzono na 30 próbkach wyselekcjonowanych przez Doktoranta spośród dostępnego materiału z rejonu basenu bałtyckiego. Wykonano szczegółową analizę porowatości przy pomocy adsorpcji azotu oraz ditlenku węgla. Wykonano także wysokociśnieniową adsorpcję metanu oraz szczegółowe analizy mineralogiczne i zdjęcia SEM. Stwierdzono, że kraking materii organicznej i występujące łącznie procesy ekspulsji i migracji węglowodorów wpływają w sposób zasadniczy na zmiany porowatości mikro- i mezo-. Porowatość obu rodzajów tworzy się w zakresie okna ropnego, przy stopniu dojrzałości termicznej materii organicznej na poziomie $R_o=0.5-0.9$ %. Powstałe w wyniku bituminy blokują pory, co skutkuje obniżeniem porowatości mikro- i mezo- w strefie średniej dojrzałości termicznej, na poziomie $R_o=0.9-1.2$ %. Przy najwyższym poziomie $R_o=1.4-1.9$ %, w trakcie wtórnego krakingu pierwotnie wygenerowanych bituminów, następuje wzrost porowatości obu typów. Stwierdzono, że uzyskane wyniki są podobne do publikowanych w r. 2013 dla łupków New Albany. Podkreślono, że wpływ zailenia na porowatość mikro- i mezo- jest nieznaczny; że od mikroporowatości zależy zdolność łupków do adsorpcji metanu i że objętość i powierzchnia mezoporów nie wpływają na wielkość adsorpcji CH_4 . Stwierdzono także, że potencjał sorpcyjny mikroporów maleje ze wzrostem dojrzałości materii organicznej. Wynik przeprowadzonego eksperymentu

pokazał, że proces adsorpcji metanu w materii organicznej przed metagenezą może współistnieć z absorpcją.

W trzecim artykule: Topór T., Derkowski A., Ziemiański P., Marynowski L., McCarty D.K., 2017a. Multi-variable constraints of gas exploration potential in the Lower Silurian shale of the Baltic Basin (Poland). *International Journal of Coal Geology* 179, 4559. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.05.001> opisano wyznaczanie stref o najwyższym potencjale występowania węglowodorów w badanych utworach. *Sweet spots* zostały wyznaczone na podstawie kompleksowej analizy badanych parametrów zbiornikowych i geochemicznych w funkcji głębokości (1328-5690 m). Szczególną uwagę zwrócono na strefy o dojrzałości termicznej R_0 z przedziału 1.0-3.5 %. Do analiz włączono wyniki ciągłych w funkcji głębokości profilowań geofizyki otworowej (spektrometrycznego profilowania gamma i spektrometrycznego profilowania neutron-gamma oraz profilowania gęstościowego). Zaproponowano wzór do obliczenia TOC na podstawie wyinterpretowanej całkowitej zawartości węgla i zawartości węgla nieorganicznego w postaci ciągłej funkcji głębokości. Utworzone mapy trendów zmian różnych parametrów zilustrowały występowanie i cechy petrofizyczne potencjalnych złóż.

Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona praca jest oryginalnym osiągnięciem mgra Tomasza Topora. Wyraźny podział czynności badawczych, interpretacyjnych i opisowych między członków zespołów autorskich, na czele których stał Doktorant, nie pozostawia wątpliwości, co do autorstwa Doktoranta w zakresie koncepcji metodycznej, wszechstronnej interpretacji wyników oraz sposobu ich prezentacji. Współpraca w zespołach obejmujących specjalistów była konieczna przy stosowaniu wysoce zaawansowanych technologicznie metod badawczych i specjalistycznego oprogramowania interpretacyjnego.

Wartościowa jest oryginalna zbiorcza analiza dolnosylurskich łupków z gazem na obszarze basenu bałtyckiego w różnych aspektach, przede wszystkim pod kątem dokładnego rozpoznania modelu porowatości w tych skałach oraz możliwości gromadzenia się w nich metanu. Bardzo staranna ocena zmian porowatości w zależności od dojrzałości termicznej materii organicznej i przedstawienie oraz udowodnienie koncepcji, że zmiany porowatości mikro- i mezo- są związane z procesami zachodzącymi w materii organicznej oraz przesunięcie wpływu zailenia na dalszy plan jest oryginalnym podejściem wyjaśniającym potencjał węglowodorowy badanych łupków z gazem.

Pokazanie podobieństwa uzyskanych wyników z osiągnięciami innych autorów na złożach łupków amerykańskich (w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie), przy równoczesnym wyraźnym podkreśleniu, że badane dolnosylurskie łupki basenu bałtyckiego zalegają na większych głębokościach, charakteryzują się mniejszą zawartością TOC oraz zróżnicowaną dojrzałością termiczną, z jednej strony wpisuje się we wspólną dla takich skał koncepcję badawczą, z drugiej pokazuje, jak ważne jest uwzględnienie indywidualnych warunków panujących w każdym basenie sedymentacyjnym.

Opracowanie i wytestowanie nowej metody badania porowatości całkowitej skał łupkowych przy równoczesnym wyznaczeniu gęstości ziarnowej i objętościowej jest ważnym elementem składowym rozprawy doktorskiej.

Spójna analiza parametrów wyznaczanych laboratoryjnie oraz wielkości mierzonych podczas profilowań geofizyki otworowej wraz z wynikami ich kompleksowej interpretacji jest udaną próbą skalowania bardzo szczegółowych ale punktowych wyników badań na próbkach z ciągłymi, jednowymiarowymi wynikami profilowań otworowych. Takie podejście świadczy o zrozumieniu przez Doktoranta konieczności prowadzenia badań kompleksowych i łączenia wyników uzyskiwanych z zastosowaniem nowoczesnych technologii w badaniach podstawowych i stosowanych w naukach o Ziemi. Takie

podejście pokazuje również nowoczesne spojrzenie badacza na skomplikowaną materię geologiczną z koniecznością wykorzystania wszelkich dostępnych wyników.

Recenzentka uważa, że Doktorant wykazał znajomość zagadnień geologicznych, geochemicznych, petrofizycznych i złożowych w zakresie badania skał łupkowych z gazem, dobre przygotowanie teoretyczne i metodyczne w zakresie pomiarów laboratoryjnych oraz znajomość nowoczesnych profilowań geofizyki otworowej. Obszerne cytowanie najnowszej i ważnej starszej literatury przedmiotu w celach porównawczych wskazuje na dobre umocowanie wyników na tle prac innych autorów, dotyczących podobnych zagadnień, ale przeprowadzonych na skałach innego wieku, z różnorodnych obszarów. Jest to potwierdzenie posiadania przez Doktoranta dobrze przygotowanego warsztatu badawczego i umiejętności prowadzenia samodzielnych badań.

Wszystkie elementy rozprawy doktorskiej są napisane w sposób zwięzły, z użyciem jasnych, precyzyjnych sformułowań, bez niepotrzebnych powtórzeń. Treści prezentowane w opublikowanych artykułach są odpowiednio ilustrowane. Cytowana literatura pokazuje orientację Doktoranta w geologicznej i złożowej problematyce dotyczącej łupków z gazem na świecie oraz w zagadnieniach pokrewnych.

Z pomiarami geofizycznymi w otworach wiąże się wątpliwość recenzentki, czy Autor właściwie rozróżnia gęstość elektronową, będącą wynikiem zjawiska Comptona, które stanowi fizyczną podstawę otworowego profilowania gęstości i gęstość objętościową, RHOB, będącą standardowym wynikiem tego profilowania. Wątpliwość ta powstała podczas lektury 3. artykułu w akapicie 4.4.2 dotyczącym *Wireline log indicators of potential targed zones*. Recenzentka zakłada, że wątpliwość zostanie wyjaśniona podczas dyskusji na publicznej obronie rozprawy doktorskiej.

Drobne usterki w opisie rozprawy typu niejednolite oznaczenie stopnia dojrzałości termicznej materii organicznej jako Rc lub Ro lub niepoprawne składniowo sformułowania w opisie w j. polskim nie obniżają wysokiej wartości rozprawy doktorskiej.

Wniosek końcowy

Recenzentka uważa, że przedstawiona rozprawa jest oryginalnym osiągnięciem Doktoranta. Jest nowatorskim opracowaniem metodycznym, dokładnie wytestowanym na trudnym materiale geologicznym. Postawione cele zostały osiągnięte, a hipotezy badawcze udowodnione. Wyniki, starannie opisane i udokumentowane są ważnym przyczynkiem do dobrego rozpoznania potencjału złożowego dolnosylurskich łupków basenu bałtyckiego, a przedstawiona metodyka może być wykorzystana do badania innych złóż podobnego typu.

Recenzentka stwierdza, że przedstawiona praca spełnia kryteria rozprawy doktorskiej zawarte w Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami i wnioskuje o dopuszczenie do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.

Wyróżnienie rozprawy doktorskiej

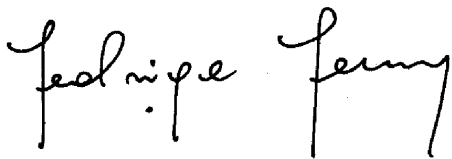
Recenzentka wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Topora. Podkreśla aktualność podjętej problematyki, zarówno w Polsce jak i na świecie. Trzy artykuły opublikowane w krótkim czasie w wysokiej klasy czasopismach o światowym zasięgu potwierdzają, że rozważana tematyka jest przedmiotem bardzo szerokiego zainteresowania.

Przedstawiony tok rozumowania i spójna analiza różnorodnych parametrów istotnych w skałach łupkowych nasyconych gazem wraz z wynikami pozwalającymi oszacować zasoby

złoża jest ważkim argumentem uzasadniającym celowość badania skał łupkowych w aspektach poznawczych i aplikacyjnych.

Recenzentka uważa, że opracowane metody i spójna metodyka badawcza przedstawiona dla dolnosylurskich łupków z gazem basenu bałtyckiego mogą być zastosowane do badania podobnych skał w innych obszarach.

Opracowana i przetestowana metoda pomiaru porowatości całkowitej i gęstości ziarnowej oraz objętościowej jest prostym a zarazem skutecznym narzędziem, które daje unikatowe wyniki w skałach o dużej zawartości minerałów ilastych.



Kraków, 12 stycznia 2018 r.