

O C E N A
osiągnięcia naukowego

**pt. „Innowacyjne badania petrofizyczne i komputerowe modelowanie dla
rozpoznania potencjału zbiornikowego i ruchu mediów w skałach”**

stanowiącego przedmiot postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego Pani dr inż. Paulinie Krakowskiej-Madejskiej prowadzonego przez Radę Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku” AGH w Krakowie.

Ocenę osiągnięcia naukowego oraz istotnej aktywności naukowej Pani dr inż. Pauliny Krakowskiej-Madejskiej dokonano na podstawie następujących, przedłożonych recenzentowi, dokumentów:

- sześciu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe;
- autoreferatu, omawiającego cele naukowe przedstawionych prac, ich wyniki oraz możliwości wykorzystania;
- omówienia pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (autorstwa habilitantki).

Przedstawione do opiniowania artykuły:

[O1] J. A. Jarzyna, **P. I. Krakowska (30%)**, E. Puskarczyk, K. Wawrzyniak-Guz, J. Bielecki, K. Tkocz, J. Tarasiuk, S. Wroński, M. Dohnalik, X-ray computed microtomography – a useful tool for petrophysical properties determination, *Computational Geosciences*, 2016, vol. 20 iss. 5, s. 1155–1167.

[O2] **P. Krakowska (75%)**, M. Dohnalik, J. Jarzyna, K. Wawrzyniak-Guz, Computed X-ray microtomography as the useful tool in petrophysics: a case study of tight carbonates Modryn formation from Poland, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 31, s. 67–75.

[O3] **P. Krakowska (55%)**, E. Puskarczyk, M. Jędrychowski, M. Habrat, P. Madejski, M. Dohnalik, Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry, *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2018, vol. 166, s. 389–405.

[O4] **P. I. Krakowska (100%)** Detailed parametrization of the pore space in tight clastic rocks from Poland based on laboratory measurement results, *Acta Geophysica*, 2019, vol. 67 iss. 6 spec. iss., s. 1765–1776.

[O5] **P. I. Krakowska-Madejska (75%)**, J. A. Jarzyna, Diverse scale data for shale gas formation description – why is digital shale rock model construction difficult?: the Polish Silurian and Ordovician rocks case study, *Minerals*, 2020, vol. 10 art. no. 108, s. 1–20.

[O6] P. Krakowska (50%), P. Madejski, Research on fluid flow and permeability in low porous rock sample using laboratory and computational techniques, *Energies*, 2019, vol. 12 iss. 24 art. no. 4684, s. 1–17.

zostały opublikowane na przestrzeni lat 2016-2020 w czasopismach o bardzo wysokiej lub wysokiej randze naukowej. W czterech z nich dr inż. Paulina Krakowska-Madejska występuje jako pierwszy współautor, w jednym jako drugi a w jednym jako jedyny autor. Deklarowany udział procentowy habilitantki w tych pracach wynosi od 30% do 100%.

Ponadto, po uzyskaniu stopnia doktora, habilitantka jest współautorką kolejnych 10 publikacji naukowych w czasopismach z listy Journal Citation Report, 7 spoza tej listy (ale punktowanych przez MNiSW) oraz 10 prac w monografiach. Prezentowała wyniki na 15 międzynarodowych i 3 krajowych konferencjach naukowych. Brała udział w komitetach organizacyjnych 2 konferencji o zasięgu międzynarodowym.

Sumaryczny impact factor IF wynosi 23.951 a liczba cytowań 92 (w tym 51 bez autocytowań). Indeks Hirscha według bazy WoS ma wartość 6.

Po uzyskaniu stopnia doktora Pani Paulina Krakowska-Madejska brała udział w jednym projekcie opartym na funduszach europejskich (Program Operacyjny Inteligentny Rozwój) oraz w 7 projektach krajowych (kierowała jednym z nich - program NCBiR Lider VI, a w sześciu była wykonawcą).

Na mocne podkreślenie i uznanie zasługuje szeroka współpraca habilitantki z sektorem gospodarczym w Polsce (Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A., Orlen Upstream Sp z o.o., Lotos Petrobaltic S.A., Instytut Nafty i Gazu PIB, Geofizyka Toruń S.A.) oraz firmami zagranicznymi (Volume Graphics, GMBH w Niemczech, Eni Energy Company Co we Włoszech oraz International Geothermal Center w Niemczech). Oprócz tego habilitantka uczestniczyła w wykonaniu 5 ekspertyz dla przedsiębiorstw, m. in. dla Orlenu i Tauronu.

Dr inż. Paulina Krakowska-Madejska współpracuje również z wieloma uczonymi z innych ośrodków naukowych w Polsce: WGGiOŚ AGH w Krakowie, ING PAN w Warszawie, Uniwersytet Śląski w Katowicach i Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

Utylitarny charakter prac prowadzonych przez habilitantkę znajduje znakomite potwierdzenie w postaci wdrożonej technologii - w ramach projektu NCBiR Lider VI, którego była kierownikiem, powstał program komputerowy poROSE do jakościowej i ilościowej interpretacji obrazów materiałów porowatych. Licencje komercyjne tego programu zostały już zakupione przez firmy w Polsce i na Węgrzech.

Należy podkreślić bogatą aktywność dydaktyczną i popularyzacyjną dr inż. Pauliny Krakowskiej-Madejskiej. Prowadzi zajęcia w języku polskim i angielskim z kilku przedmiotów dla studentów kierunku Geofizyka oraz kierunku Inżynieria Środowiska na WGGiOŚ AGH w Krakowie. W latach 2018-2019 miała zajęcia z petrofizyki dla studentów z Arabii Saudyjskiej a w 2018 r. z petrofizyki i geofizyki otworowej dla studentów z Wietnamu (Erasmus+). Od wielu lat prowadzi zajęcia dydaktyczne dla słuchaczy Państwowego Technicznego Uniwersytetu Nafty i Gazu na Ukrainie. Była opiekunką 7 prac magisterskich i 9 inżynierskich oraz grantów rektorskich na AGH. Organizowała warsztaty geofizyczne, współorganizowała trzykrotnie konferencję Geofizyka w Kosmosie, a w roku 2019 współuczestniczyła w organizacji konferencji międzynarodowej Challenges in Applied Geology and Geophysics w Krakowie. Jej ogromna aktywność na tym polu została doceniona przez rektora AGH i w 2018 r. habilitantka otrzymała indywidualną Nagrodę Rektora III stopnia za osiągnięcia dydaktyczne.

Aktywność naukowa dr inż. Pauliny Krakowskiej-Madejskiej również została wyróżniona - trzykrotnie była laureatką Nagrody Rektora III stopnia za osiągnięcia naukowe. O jej znaczącej pozycji w środowisku naukowym świadczy też fakt, że była proszona o wykonanie ponad 20 recenzji przez polskie i zagraniczne czasopisma naukowe.

Ocena wartości merytorycznej osiągnięcia naukowego

Wszystkie przedstawione do oceny artykuły, w dziedzinie stanowiącej przedmiot zainteresowań naukowych habilitantki, zostały opublikowane w czasopiśmie o wysokiej międzynarodowej randze naukowej, co już samo w sobie stanowi podstawę do ich wysokiej oceny.

Tytuł osiągnięcia naukowego „Innowacyjne badania petrofizyczne i komputerowe modelowanie dla rozpoznania potencjału zbiornikowego i ruchu mediów w skałach” dobrze odzwierciedla zawartość przedłożonego cyklu 6-ciu artykułów. Co jest ciekawe, cykl ten zarazem przedstawia dobrze przemyślaną drogę naukową habilitantki – logiczną strategię rozwijania wybranej tematyki. W tym kontekście wykonanie recenzji osiągnięcia naukowego jest przyjemnym doświadczeniem dla recenzenta. Dowiaduje się on o kolejnych pytaniach i zadaniach stawianym sobie przez habilitantkę oraz o wybranych drogach ich realizacji.

Tematyka dotyczy zagadnienia określenia potencjału zbiornikowego skał, bardzo ważnego w ocenie zawartości węglowodorów lub wód geotermalnych. Pani Paulina Krakowska-Madejska skupia się na badaniu skał niskoporowych i niskoprzepuszczalnych występujących w Polsce, które są klasyfikowane jako potencjalne formacje zbiornikowe gazu zamkniętego. Metodyka rozwijana przez habilitantkę ma na celu określenie zdolności do gromadzenia oraz, co ważne, do oddawania mediów zawartych w przestrzeni porowej. Myślą przewodnią jest jak najbardziej efektywne wykorzystanie, najnowszej w petrofizycznej analizie, metody rentgenowskiej tomografii komputerowej do rekonstrukcji geometrii porów, szczelin i sieci połączeń między nimi w skałach i innych materiałach.

Artykuł [O1] zawiera wstępne wyniki potwierdzające zasadność stosowania metody rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT). W tym celu autorzy wykorzystali dane z wielu badań laboratoryjnych (piknometria helowa, porozymetria rtęciowa, spektrometria magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR)) zastosowanych do: próbek mioceńskich skał piaskowo-mułowcowo-iłowcowych, próbki mułowca i zbitego wapienia oraz sztucznych próbek korundowych. Wyniki te skonfrontowano z rezultatami otrzymanymi za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej. Otrzymane wnioski pokazały złożoność problemu. Metoda NMR potwierdza dane o porowatości uzyskane z metod standardowych i uzupełnia je o informacje o saturacji wodą. Natomiast metoda rentgenowskiej tomografii komputerowej dobrze sprawdza się dla materiałów jednorodnych, ale daje zmienne wyniki dla skał niejednorodnych, ponieważ pracuje na małych próbkach. W takich przypadkach należy zbadać więcej próbek wyciętych z różnych miejsc w badanej skale.

Praca [O2] przedstawia bardziej szczegółowe opracowania wyników otrzymanych metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej. Badane były próbki skał węglanowych o niskiej porowatości i przepuszczalności pobranych z otworów wiertniczych z rejonów Polski o potencjale gazonośnym. Analiza CT wykazała słabo rozwiniętą przestrzeń porową o małym stopniu połączeń. Dla parametryzacji obrazów CT wykorzystano: klasy objętości porów, parametr jednorodności skały, średnią długość cięciwy, liczbę Eulera i porowatość całkowitą. Tym razem do analizy CT podzielono próbkę na dwie podpróbki w celu ustalenia stopnia niejednorodności struktury porowej.

Dalszy rozwój podejścia opartego na CT zawiera publikacja [O3]. Zbadano 15 próbek związłego piaskowca z gazem zamkniętym pobranych z głębokich (ponad 3000 m) otworów wiertniczych. Wykonano różnorodne pomiary laboratoryjne (NMR, porozymetrię rtęciową, granulometrię, pomiary przepuszczalności absolutnej), które zostały następnie skonfrontowane z wynikami CT. Wizualizacja i interpretacja badań CT została wykonana za pomocą zaawansowanego programu poROSE, stworzonego w ramach projektu LIDER VI przez zespół kierowany przez habilitantkę. Do lokalizacji porów zastosowano semiwariogram, aby oszacować niejednorodności w ich orientacji przestrzennej. Do określenia gardzieli porowych

zaproponowano nową metodę opartą na najlepszym dopasowaniu elipsoidy wpisanej w pory. Znalaziono ciekawe relacje między średnicą elipsoidy wyznaczoną z CT a innymi parametrami.

Następny artykuł [O4] jest jeszcze bardziej nakierowany na badanie zdolności przepływowych cieczy w skałach o niskiej porowatości. Analizowane były próbki 20 zwięzłych piaskowców i 11 mułowców pobranych z głębokich otworów wiertniczych w Polsce. Autorka pracy skupiła się na zbadaniu kształtu porów (średnia grubość, anizotropia, wydłużenie, sferyczność, średnica, współczynnik i kształt Fereta, współczynniki Danielssona i Malinowskiej) oraz analizie szkieletu przestrzeni porowej (liczba skrzyżowań, gałęzi, liczba koordynacyjna). Do tego celu wykorzystano metodę CT wraz z pakietem programu poROSE, posiłkując się wynikami z NMR. Zaproponowano równanie do estymacji przepuszczalności absolutnej wykorzystujące jedynie wyniki z metody CT.

Celem publikacji [O5] było wykazanie korelacji pomiędzy parametrami petrofizycznymi otrzymanymi z metod o różnej skali, tj. skali mezo (z profilowań geofizyki otworowej) i skali mikro (z badań laboratoryjnych na próbkach skał) i powiązania ich z nanoskopowym opisem otrzymanym z CT. Zbadano 19 próbek z rdzeni wiertniczych skał łupkowych z trzech lokalizacji w Polsce. Profilowanie geofizyki otworowej obejmowało m. in. badania zawartości pierwiastków promieniotwórczych, oporności elektrycznej, porowatości neutronowej, gęstości objętościowej i absorpcji fotoelektrycznej. Natomiast pomiary laboratoryjne dotyczyły: porozymetrii rtęciowej, NMR, adsorpcji /desorpcji par azotu, metody pulse-pressure-decay oraz analizy CT. Znalaziono korelacje pomiędzy zawartością materii organicznej zidentyfikowanej przez spektrometryczne profilowanie gamma a całkowitą objętością porów określoną metodą adsorpcji /desorpcji par azotu. Zbadano wpływ nanoporów na porowatość formacji łupkowych. Obrazowanie metodą CT dostarczyło informacji o strukturze przestrzeni porowej w próbkach. Ciekawym wynikiem była korelacja pomiędzy współczynnikiem Fereta a przepuszczalnością absolutną oraz zawartością kwarcu w próbce.

Artykuł [O6], choć chronologicznie opublikowany wcześniej niż [O5], zapewne celowo został umieszczony na końcu listy. Również w moim mniemaniu stanowi on pewne ukoronowanie wcześniejszej aktywności. Sensem rekonstrukcji przestrzeni porowej i szczelinowej uzyskanej dzięki analizie opartej na CT jest bowiem nie tylko określenie potencjału zbiornikowego skał, ale również analiza przepływu płynów przez taki ośrodek. Praca [O6] jest temu dedykowana i przedstawia wyniki symulacji przepływu płynu w zwięzłym piaskowcu. W tym celu przestrzeń porowa, odwzorowana przy pomocy CT wraz z dodatkowym pakietem poROSE, musiała zostać wymodelowana przez siatkę numeryczną (ponad półtora miliona wielościennych form). Do symulacji laminarnego przepływu płynu użyto numerycznych metod rozwiązywania równań Naviera-Stokesa z warunkiem poślizgu Maxwella. Testowane były różne postacie równań stanu. W symulacjach przepływu przyjęto warunki brzegowe w formie różnicy ciśnień między wlotem a wylotem próbki. Wyniki symulacji porównano z danymi otrzymanymi z pomiarów laboratoryjnych z wykorzystaniem przepuszczalnościomierza gazowego. Uzyskano podobne wielkości przepuszczalności absolutnej. Wyniki z pracy [O6] są bardzo ważne, ponieważ stanowią silne potwierdzenie przyjętej przez dr inż. Paulinę Krakowską-Madejską tezy, że odpowiednio wykorzystana metoda rentgenowskiej tomografii komputerowej prowadzi do rekonstrukcji porowatości skał w skali mikro i nano (daje realny obraz tej struktury), na podstawie której przeprowadzone symulacje przepływu płynu dają możliwość wyznaczenia relacji w skali makro, np. przepuszczalności absolutnej.

Podsumowując, cykl prac stanowi pewną całość, która jest realizacją dobrze przemyślanej koncepcji opracowania nieinwazyjnej metody obrazowania w skali mikro przestrzeni porowej i szczelinowej oraz stworzenia numerycznego aparatu opisującego przepływ mediów przez sieć połączeń istniejących w tej przestrzeni. Oczywiście ta wspomniana 'pewna całość' nie

jest zamknięta i niewątpliwie będzie dalej udoskonalana. Metodyka opracowana przez dr inż. Paulinę Krakowską-Madejską ma duże znaczenie uylitarne, zarówno w geofizyce jak i innych działach nauki i gospodarki, takich jak np. budownictwo, medycyna, inżynieria materiałowa.

Wniosek końcowy

Recenzowane osiągnięcie naukowe dr inż. Pauliny Krakowskiej-Madejskiej wnosi poważny wkład w rozwój nowoczesnej metodyki wykorzystywanej w petrofizyce. Wyniki prezentowanych prac są bardzo ciekawe a nawet pionierskie. Posiadają duże znaczenie uylitarne w geofizyce poszukiwawczej. Osiągnięcie naukowe oceniam bardzo pozytywnie.

Zarówno osiągnięcie naukowe, pozostały dorobek i aktywność naukowa oraz ponadprzeciętna aktywność dydaktyczna dr inż. Pauliny Krakowskiej-Madejskiej spełniają warunki i wymagania konieczne do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego, zgodnie z art. 219 Ustawy prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie dr inż. Pauliny Krakowskiej-Madejskiej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego.

Zbigniew Czoch