



**Referat wygłoszony w dniu 17 grudnia 2025r. na posiedzeniu
Komisji Nauk Geologicznych PAN Oddział w Krakowie**

Polska Akademia Nauk
Oddział w Krakowie
Komisja Nauk Geologicznych

Dr hab. inż. Paulina Krakowska-Madejska, prof. AGH

Mgr inż. Sebastian Waszkiewicz

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

Katedra Geofizyki

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

e-mail: krakow@agh.edu.pl; ORCID: 0000-0002-8261-4350, e-mail: waszkiewicz@agh.edu.pl, ORCID:
0000-0002-0887-770X

Rentgenowska tomografia komputerowa - bezinwazyjne narzędzie do badania struktury porowej skał.

Przykład utworów miocenu zapadliska przedkarpackiego

Wstęp

Analiza przestrzeni porowej skał jest kluczowym elementem badań petrofizycznych, umożliwiających ocenę właściwości zbiornikowych ośrodka skalnego. W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój nieniszczących metod obrazowania, wśród których szczególne znaczenie zyskała rentgenowska tomografia komputerowa (CT). Technika CT pozwala na trójwymiarową wizualizację wewnętrznej struktury skał bez ingerencji w ich integralność, co umożliwia precyzyjne określenie parametrów przestrzeni porowej takich jak: porowatość całkowita, rozkład wielkości porów, charakter sieci porowej oraz obecność kawern i szczelin (Ketcham & Carlson, 2001; Wildenschild & Sheppard, 2013).

Rentgenowska tomografia komputerowa znajduje zastosowanie w badaniach skał o zróżnicowanej litologii, w tym wapieni, piaskowców i zlepieńców, umożliwiając rozróżnienie porów, szczelin i kawern oraz analizę zmienności struktury porowej w rdzeniach wiertniczych (Iassonov et al., 2009). CT, dzięki rozdzielczości rzędu kilku mikrometrów (micro-CT), pozwala na szczegółową analizę mikrostruktury skał zbiornikowych, w tym ilościowe pomiary porowatości, dystrybucji wielkości porów oraz parametrów systemu kanalików i gardzieli porowych (Bultreys et al., 2016; Krakowska-Madejska, 2024). Technika CT jest szczególnie

cenna w badaniach skał zbiornikowych w złożach konwencjonalnych i niekonwencjonalnych, takich jak łupki gazonośne, gdzie umożliwia rekonstrukcję przestrzeni porowej w trzech wymiarach i ocenę jej wpływu na migrację płynów złożowych (Crandall et al., 2017).

Materiał i metoda

Materiał geologiczny stanowiły utwory miocenu autochtonicznego, wykształcone jako iłowce, mułowce przewarstwione piaskowcami. Próbkę z rdzeni wiertniczych (45 sztuk) były pobrane z głębokości powyżej 2 km z otworu wiertniczego zlokalizowanego we wschodniej części zapadliska przedkarpackiego.

Rentgenowska tomografia komputerowa polega na prześwietlaniu próbki skalnej promieniowaniem rentgenowskim. Następnie, projekcje podlegają przetworzeniu do uzyskania obrazu struktury wewnętrznej skał w układzie 3D (sekwencja przekrojów). W prezentowanym przykładzie, w ramach przetwarzania obrazów usunięto obiekty o objętości do 99 wokseli, uznając je za szum pomiarowy. Obiektem zainteresowania była przestrzeń porowa skał miocennych, w celu zbadania parametrów geometrycznych porów, np. średnic, objętości, pola powierzchni porów, stopnia wykształcenia połączeń pomiędzy większymi porami (kanały i gardziele porowe). Obliczenia zostały wykonane w programie poROSE – poROus materials examination SoftwarE (Krakowska-Madejska et al., 2019).

Wyniki

Badane próbki charakteryzowały się obniżonymi parametrami zbiornikowymi i filtracyjnymi. Pobrane były z warstw piaskowcowych o różnym stopniu zailenia (9.8 do 32.3% zawartości sumy minerałów ilastych). Porowatość całkowita, wyznaczona na podstawie CT, osiągnęła wartość do około 5%. Na etapie przetwarzania obrazu usunięte zostały obiekty z najniższej klasy objętości 1-99 wokseli (czyli do około $71 \mu\text{m}^3$), stąd porowatość z CT jest zaniżona. Zidentyfikowane obiekty (pojedyncze pory lub pory wraz z kanalikami i gardzielami porowymi) są odizolowane i nie tworzą zintegrowanej sieci porowej.

W próbkach dominują dwie najniższe klasy objętości porów: 100-999 oraz 1000-9999 wokseli. W próbce 489 (Fig. 1) zidentyfikowano 615 obiektów z przedziału objętości 100-9999999 wokseli (ok. $71\text{--}7193230 \mu\text{m}^3$). Rozkład średnic porów (Fig. 2) jest zróżnicowany, co wskazuje na zróżnicowane wykształcenie przestrzeni porowej. Przedmiotem analizy była grubość (ang. *Thickness*), czyli średnica kuli wpisanej w obiekt wyróżniony na obrazie 3D. Na Fig. 3 przedstawiono związek liczby Eulera i pola powierzchni porów (ang. *Surface Area*). Im niższa jest liczba Eulera, tym sieć porowa jest lepiej wykształcona (pory połączone, dobre zdolności filtracyjne). W analizowanym materiale jedynie kilka próbek wykazuje wartości ujemne. Oprócz kilku próbek (w tym 531), większość wykazuje poprawny trend spadku liczby Eulera (wzrost zdolności filtracyjnych) ze wzrostem pola powierzchni porów.

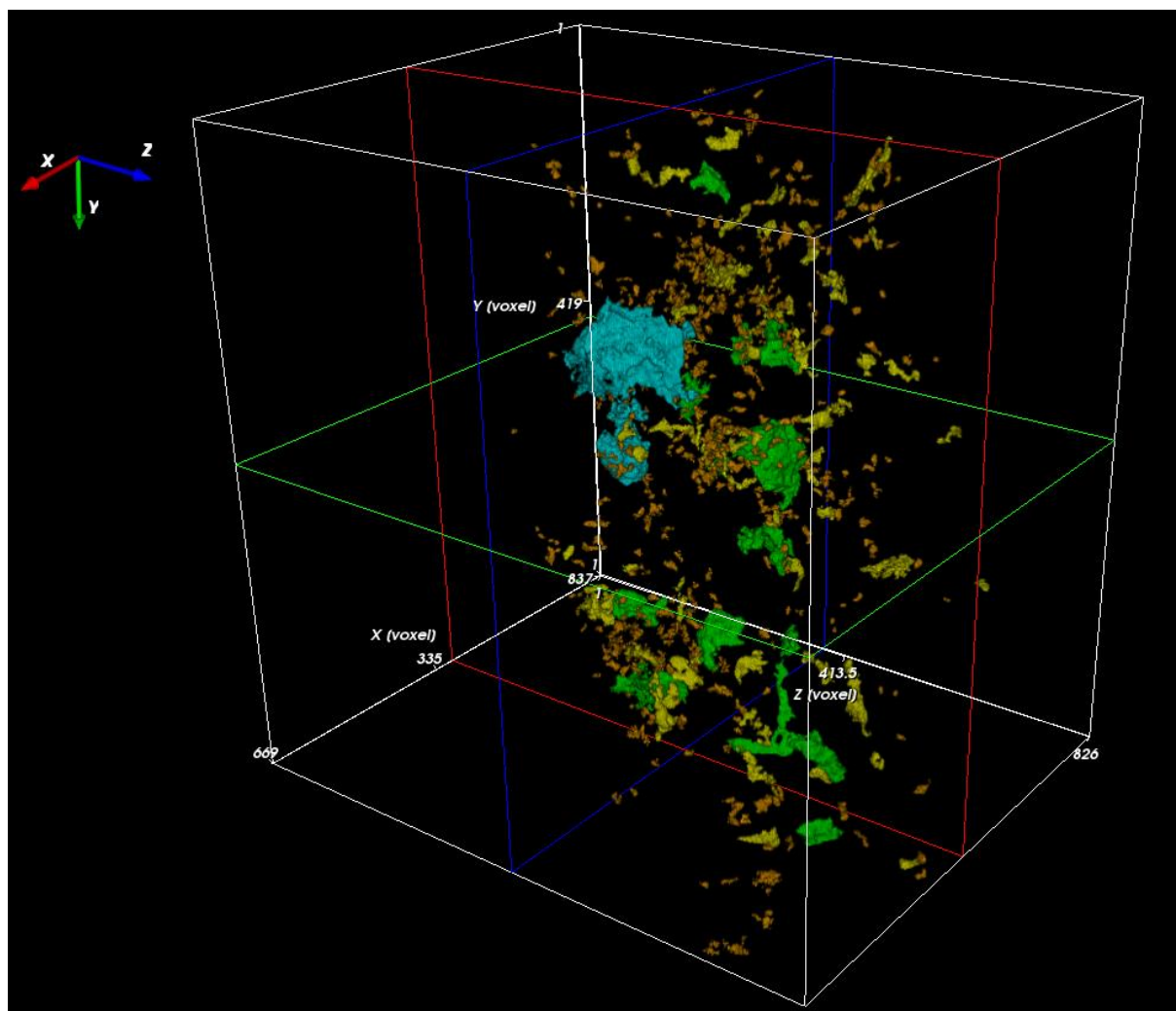


Fig. 1. Próbka 489, w której zidentyfikowano 615 obiektów z przedziału objętości 100-9999999 wokseli (ok. 71-7193230 μm^3). Kolor obiektów odpowiada klasie objętości: pomarańczowy – klasa objętości z zakresu 100-999 wokseli, żółty – zakres 1000-9999, zielony – zakres 10000-99999, jasnoniebieski – zakres 100000-999999, ciemnoniebieski – zakres 1000000-9999999. Próbka ma następujący skład mineralny: suma zawartości kwarcu, plagioklazów i skaleni potasowych – 64.5%, suma zawartości kalcytu, dolomitu, ankerytu, kutnahorytu – 20%, zawartość minerałów ilastych (miki, illit, minerał mieszanopakietowy illit-smektyt, chloryt, kaolinit) – 15%

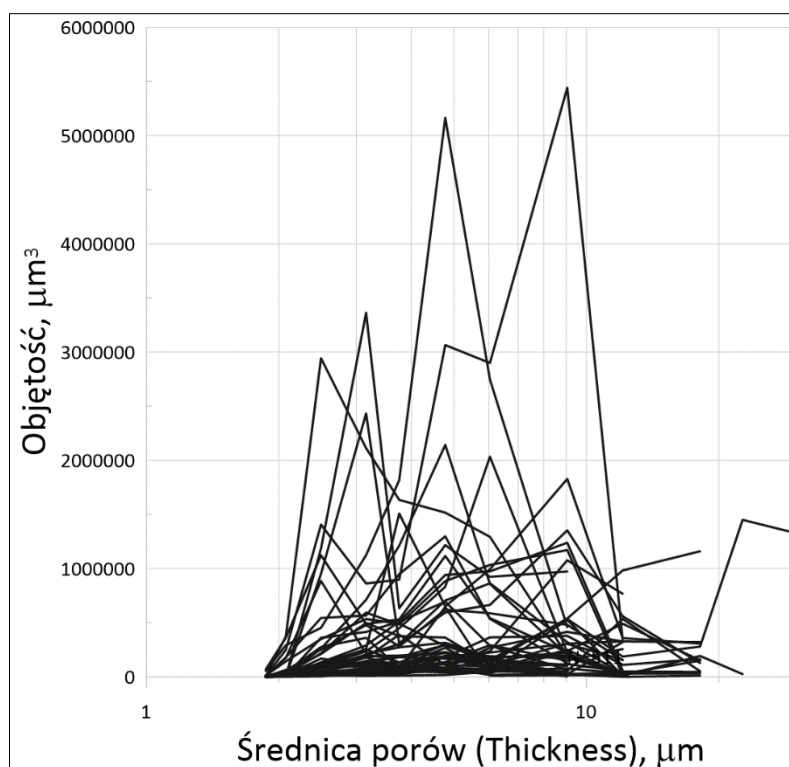


Fig. 2. Średnica porów obliczona jako grubość (Thickness) (średnica kuli wpisanej w obiekt)

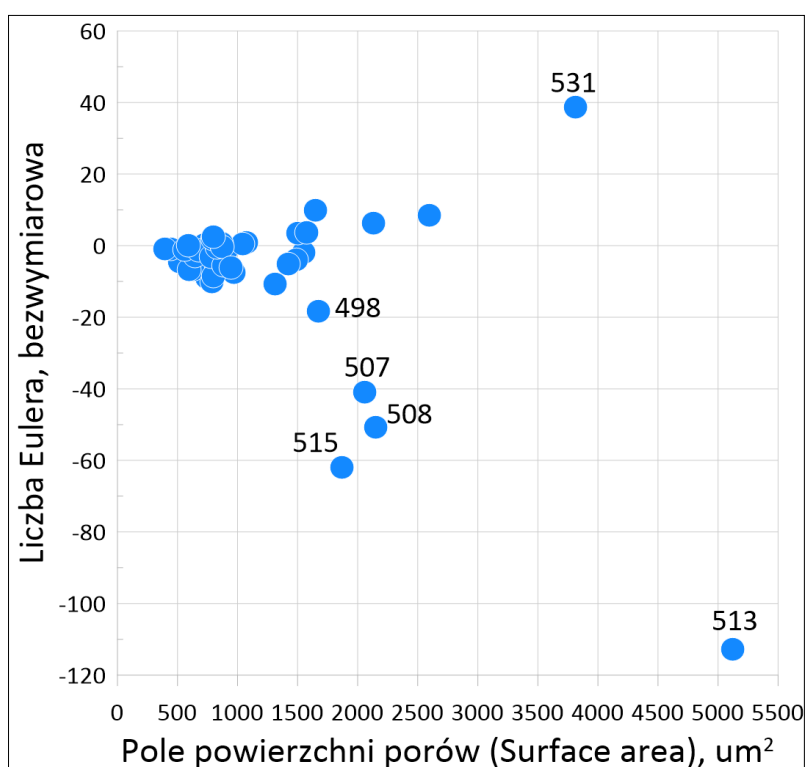


Fig. 3. Związek liczby Eulera i pola powierzchni porów (Surface Area). Ujemne wartości liczby Eulera wskazują na lepsze własności filtracyjne

Podsumowanie

Postęp w technologii obrazowania 3D sprawia, że metoda CT dla różnych uzyskiwanych rozdzielczości (nano, mikro i makro) jest obecnie nieodzownym narzędziem w nowoczesnych badaniach petrofizycznych. Dostarcza ona dane niezbędne do modelowania przepuszczalności, symulacji procesów filtracyjnych oraz oceny jakości skał zbiornikowych w kontekście eksploatacji złóż węglowodorów. Zastosowanie CT pozwala na uzyskanie pełniejszej informacji o strukturze porowej niż tradycyjne metody dwuwymiarowe, co czyni ją kluczowym elementem współczesnych analiz geologicznych.

Literatura

Bultreys, T., De Boever, W., & Cnudde, V. (2016). Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art. *Earth-Science Reviews*, 155, 93–128.

Crandall, D., Moore, J., Gill, M., & Stadelman, M. (2017). CT scanning and flow measurements of shale fractures after multiple shearing events. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100, 177–187.

Iassonov, P., Gebrenegus, T., & Tuller, M. (2009). Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. *Water Resources Research*, 45(9), W09415.

Ketcham, R. A., & Carlson, W. D. (2001). Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 27(4), 381–400.

Krakowska-Madejska, P., Habrat, M., Madejski, P., Puskarczyk, E., Jędrychowski, M. (2019) Raport końcowy z projektu: „Nowatorska metodyka interpretacji niekonwencjonalnych złóż ropy i gazu z wykorzystaniem wyników rentgenowskiej tomografii komputerowej”, Nr LIDER/319/L-6/14/NCBR/2015, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Centrum Wsparcia i Transferu Technologii AGH w Krakowie, program poROSE licencjonowany na umowach komercyjnych i badawczych

Krakowska-Madejska, P. (2024). Tortuosity of pore channels in tight rocks as a key parameter in fluid flow ability. *Acta Geophysica*, 72(5), 3211–3221.

Wildenschild, D., & Sheppard, A. P. (2013). X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems. *Advances in Water Resources*, 51, 217–246.