

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Klasyfikacja wielkości porów na podstawie metody mikrotomografii rentgenowskiej

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów porowatości całkowitej i podjęto próbę klasyfikacji wielkości porów ze względu na ich objętość, dla przykładowych dwóch próbek skał węglanowych pochodzących z utworów dolomitu głównego. Porowatość i rozkład wielkości porów określano z użyciem mikrotomografu rentgenowskiego oraz komputerowych technik obrazowania. Do wykonania pomiarów wykorzystano system Benchtop z wiązką stożkową.

Pore size classification based on X-ray microtomography method

The study presents total porosity measurements results and an attempt of pore sizes classification based on their volume, for exemplary two samples of carbonate rocks of Main Dolomite origin. Porosity and pore size distribution have been determined by means of X-ray microtomography scanner and computed imaging techniques. Benchtop system with fan type beam was used for the measurements.

Wstęp

Nieniszczące obrazowanie techniką mikrotomografii rentgenowskiej jest unikalną i atrakcyjną metodą do szybkiego gromadzenia informacji – tak jakościowych jak i ilościowych – o geometrii przestrzeni porowej; przy zachowaniu przewodności i zmienności przestrzennej, dostarczając nowoczesnego podejścia do oceny petrofizycznej porowatych skał zbiornikowych [1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 13, 14].

Zadaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej jest odtworzenie przekroju obiektu na podstawie tłumienia promieniowania rentgenowskiego X. W przypadku materiałów jednorodnych polega to na tym, że promienie X wnikając w próbkę są przez nią pochłaniane i wytwarzają wtórne promienie X. To wtórne promieniowanie X posiada zazwyczaj niższą energię i opuszczając próbkę jest mierzone w celu określenia tłumienia (μ) tego promieniowania. Absorbcyjność próbki oblicza się wprost z prawa Beera, znając: natężenie padającego promieniowania X, I_0 , natężenie promieniowania wychodzącego (I) oraz grubość próbki x [14]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

gdzie:

I – natężenie wiązki po przejściu przez ośrodek,

I_0 – natężenie wiązki padającej,

x – grubość absorbenta,

μ – całkowity współczynnik absorpcji (pochłaniania) – zwany również współczynnikiem tłumienia liniowego, który jest sumą trzech współczynników absorpcji (comptonowskiej, fotoelektrycznej i tworzenia par). W zależności od energii promieniowania, względny udział poszczególnych składowych może się znacznie zmieniać.

W geologii zazwyczaj mamy do czynienia z próbkami heterogenicznymi i stąd konieczne jest uwzględnianie, w jakim stopniu padający foton jest tłumiony wzdłuż swojej ścieżki przez materiał. W tym celu konieczne jest zastosowanie całki μ po długości ścieżki (grubości) próbki, w celu uwzględnienia zmian występujących w μ wzdłuż ścieżki padania promieni X [14]:

$$I = I_0 e^{-\int \mu(x) dx} \quad (2)$$

Więcej szczegółów na temat tworzenie trójwymiarowych obrazów próbek rdzeni skalnych z jednorodną rozdzielczością we wszystkich trzech kierunkach można znaleźć w m.in. pracach [8, 9, 11, 12, 13].

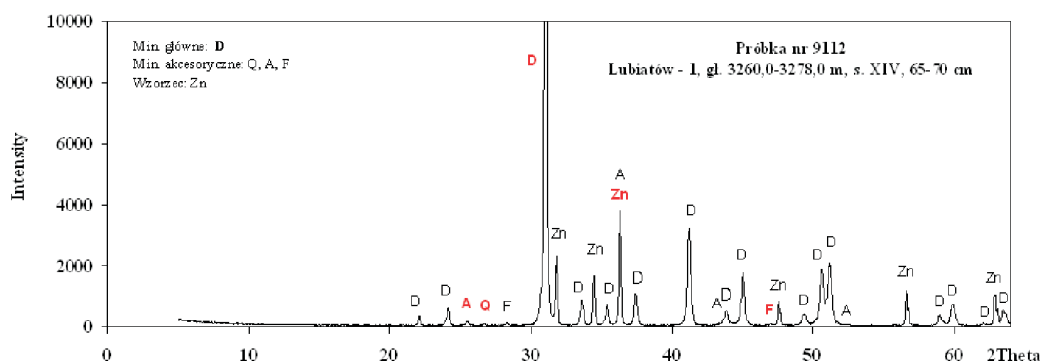
Wyniki badań

W pracy przedstawiono wyniki wizualizacji 3D przestrzeni porowej oraz ilościowe pomiary porowatości całkowitej i rozkładu wielkości porów dla dwóch próbek skał węglanowych pochodzących z utworów dolomitu głównego. Parametry te określano przy zastosowaniu mikrotomografu Benchtop CT160 z wiązką stożkową. Szczegóły budowy i zasady działania tego urządzenia zostały opisane w pracy [15].

Próbka 9112

Obraz trójwymiarowej wizualizacji przestrzeni porowej próbki 9112, wygenerowanej na podstawie danych micro-CT, przedstawiono na rysunku 2. Zwizualizowana próbka była prostopadłościanem o wymiarach boku $500 \times 500 \times 175$ wokseli, zmierzoną w trzech kierunkach: X, Y, Z.

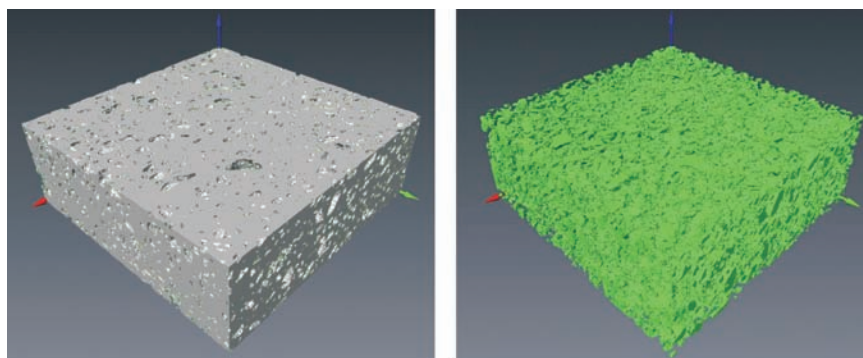
Z pierwotnej struktury całej próbki (rys. 2), wybrano dwie podpróbki (oznaczając je symbolem A i B) – w jednakowy sposób dla obu próbek i przy takiej samej orientacji kierunków. Metoda wydzielenia podpróbek została opisana w pracy Zalewska et al. [5]. Aby umożliwić analizę uzyskanych obrazów zostały one przeskalowane, czego wynikiem było



Rys. 1. Ocena składu mineralnego próbek na podstawie interpretacji dyfraktogramów rentgenowskich

(D – dolomit, Q – kwarc, A – anhydryt, F – fluoryt, Zn – cynkity – wzorzec)

Badania realizowano na próbkach rdzeni wiertniczych o średnicy 1 cm, przy optymalnych parametrach pomiaru, co dało rozdzielczość obrazu równą $5,9 \mu\text{m}$ i pozwoliło na bardzo dobrą wizualizację przestrzeni porowej oraz ilościowe ujęcie porów. Dla jednej próbki rekonstruowano 2800 projekcji, za pomocą oprogramowania CT-Pro, firmy X-TEK, które były analizowane za pomocą specjalistycznego oprogramowania MAVI.

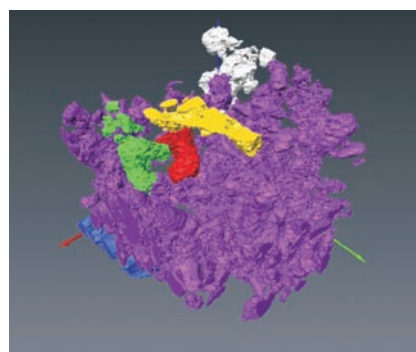


Rys. 2. Wizualizacja struktury przestrzeni porowej całej próbki 9112, z głębokości 3273,65 m

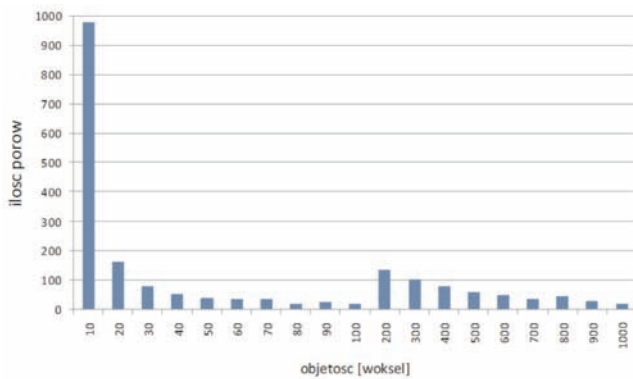
Po lewej – 3D szkielet skały (bez porów), po prawej – 3D przestrzeń porowa

Badaniom poddano dwie próbki: o numerach 9112 i 9114, pochodzące z głębokości odpowiednio: 3273,65 m i 3277,35 m. Mimo że próbki znajdowały się w niewielkiej odległości od siebie to ich porowatość ogólna znacząco się różniła. Średnia porowatość dla próbki 9112 wynosiła $27,37 \pm 0,94\%$, a dla próbki 9114 – $2,52 \pm 1,27\%$.

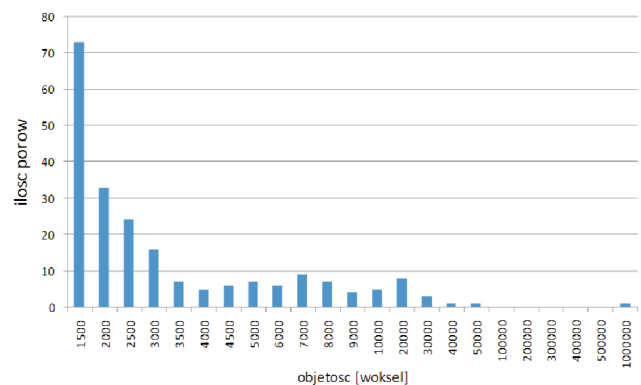
Na podstawie analizy rentgenowskiej stwierdzono, że obydwie próbki to niemal czyste dolomity, zawierające w swym składzie 97% tego minerału (rysunek 1). Pozostałe minerały – takie jak kwarc, anhydryt i fluoryt – występowały w ilościach śladowych (poniżej 1%).



Rys. 3. Wizualizacja sześciu największych podtypów porów – próbka 9112 podpróbka A



wartość pierwszej kolumny: 2139



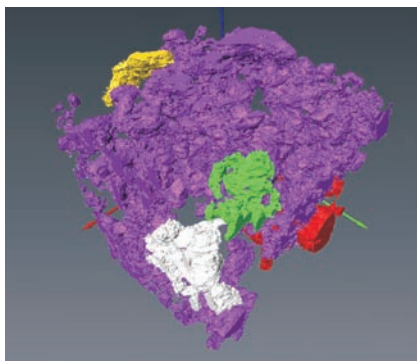
wartość pierwszej kolumny: 72

Rys. 4. Klasyfikacja porów ze względu na ich objętość – próbka 9112 podpróbka A ($Kp=27,54\%$)

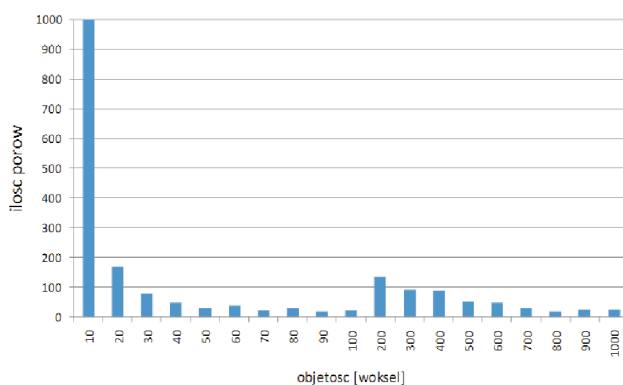
Po lewej – klasyfikacja porów do 1000 wokseli, po prawej – klasyfikacja porów powyżej 1000 wokseli

uzyskanie woksela o rozmiarach $11,8 \times 11,8 \times 11,8 \mu\text{m}^3$ [$1,73 \times 10^{-6} \text{mm}^3$]. Wydzielone podpróbki były prostopadłościanami o bokach $200 \times 200 \times 175$ wokseli.

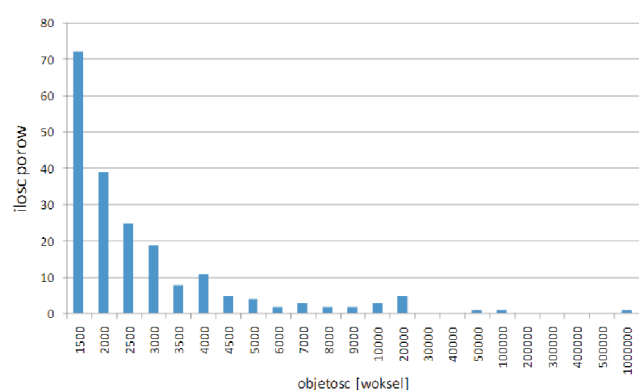
Kolejnym krokiem było przeprowadzenie wizualizacji sześciu największych podtypów porów występujących w każdej z podpróbek (9112A – rysunek 3 i 9112B – rysunek 5).



Rys. 5. Wizualizacja sześciu największych podtypów porów – próbka 9112 podpróbka B



wartość pierwszej kolumny: 2207



wartość pierwszej kolumny: 72

Rys. 6. Klasyfikacja porów ze względu na ich objętość – próbka 9112 podpróbka B ($Kp=26,86\%$)

Po lewej – klasyfikacja porów do 1000 wokseli, po prawej – klasyfikacja porów powyżej 1000 wokseli

Następnie przeprowadzono analizę porowatości i sklasyfikowano pory ze względu na ich objętość dla każdej pod próbki (9112A – rysunek 4 i 9112B – rysunek 6). Pory podzielono na dwie grupy:

- pory o objętości – poniżej tysiąca wokseli,
- pory o objętości – powyżej tysiąca wokseli.

Dla każdej z grup wyznaczono przedziały dla porów tak, że dany słupek przedstawia ilość porów z przedziału: 0-10, 10-20 ... 900-1000 oraz 1000-2000, 2000-3000 ... 10 000-20 000 ... 100 000-200 000 ... 1 000 000 wokseli.

Zwizualizowane na rysunku 2 sześć największych podtypów porów (powyżej 1000 wokseli) dla próbki 9112A przedstawiono na histogramie (rysunek 3B) – skąd można wyznaczyć przedział objętościowy, do którego należą.

Histogramy ilustrują ilościowy udział porów w analizowanej próbce. Wykres po lewej stronie pokazuje pory o objętości do 1000 wokseli. Jako maksymalną wartość osi Y na tym wykresie przyjęto 1000, aby umożliwić łatwiejszy odczyt ilości porów z klas o objętościach

większych od 10 wokseli. Pod wykresem znajduje się wartość pierwszej kolumny. Wartość ta została podana dlatego, że zazwyczaj jest ona znacznie większa od przyjętej maksymalnej wartości osi Y. W większości analizowanych próbek pory z zakresu 0-10 wokseli stanowią najliczniejszą grupę. Wykres po prawej stronie (rysunek 4) przedstawia ilościowy udział porów o objętości powyżej 1000 wokseli. Odczytując na tym wykresie sześć ostatnich podtypów porów (od prawej strony) można ocenić, do jakiego przedziału objętości należy te 6 podsieci. Należy tu mieć na uwadze, iż nie jest to sześć ostatnich słupków, gdyż wartość słupka na osi Y podaje informację, ile podtypów należących do danej klasy objętości znajduje się w analizowanej próbce.

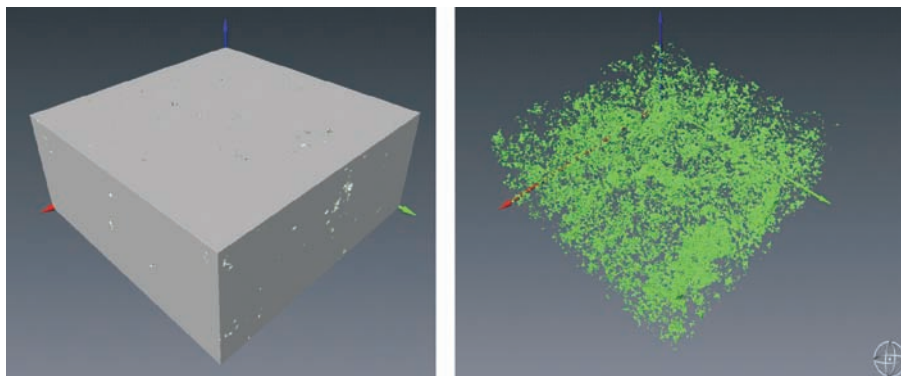
Analogiczną klasyfikację przeprowadzono dla podpróbki 9112B – co zostało zilustrowane na rysunkach 5 i 6.

Porównując uzyskane dla podpróbek 9112A i 9112B (rysunki 4 i 6) przedziały objętości sześciu największych podsieci, zauważa się, że w podpróbce A przeważają pory o objętości z zakresu 20 000-30 000 wokseli (3 podtypy), natomiast w pod próbce B przeważają podsieci o objętości 10 000-20 000 (3 podtypy) wokseli.

Próbka 9114

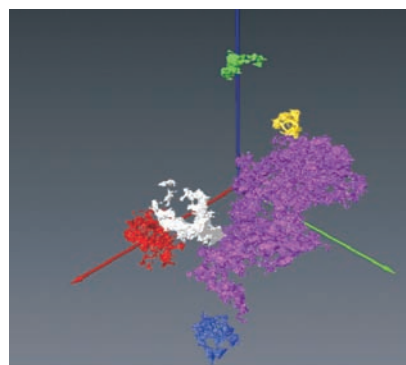
Taką samą analizę przeprowadzono dla próbki 9114 – o znacznie niższej porowatości niż omawiana wcześniej próbka 9112. Wizualizacja struktury przestrzeni porowej

całej próbki 9114 została przedstawiona na rysunku 7. Porównując całą zwizualizowaną przestrzeń porową obu próbek (rysunki 2 i 7), ewidentnie widać między nimi różnicę. W przestrzennym obrazie próbki 9114 (rysunek 7 – po lewej stronie) jest znacznie mniej ubytków w bryle skały, w stosunku do tego samego obrazu w próbce 9112 (rysunek 2 – po lewej stronie). To samo można powiedzieć o 3D przestrzeni porowej (rysunki 2 i 7 – po prawej stronie).

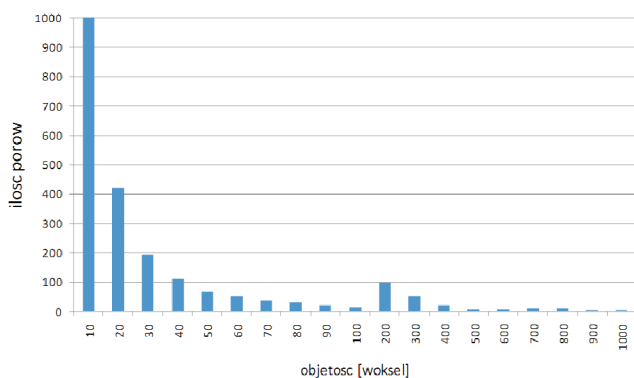


Rys. 7. Wizualizacja struktury przestrzeni porowej całej próbki 9114, z głębokości: 3277,35 m

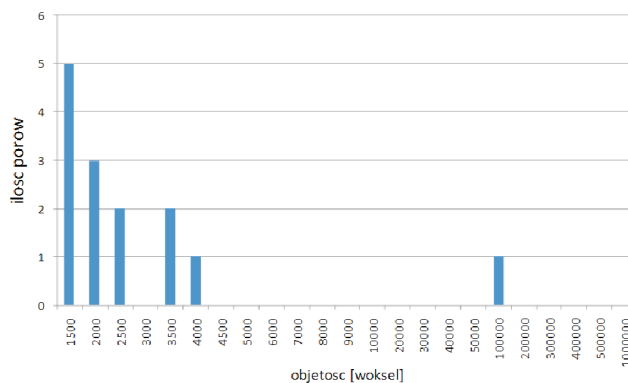
Po lewej – 3D szkielet skały (bez porów), po prawej – 3D przestrzeń porowa



Rys. 8. Wizualizacja sześciu największych podtypów porów – próbka 9114 podpróbka A



wartość pierwszej kolumny: 4148



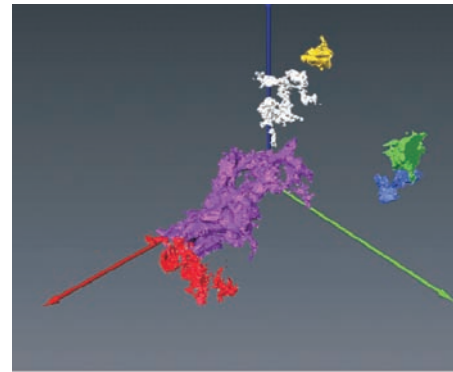
wartość pierwszej kolumny: 5

Rys. 9. Klasyfikacja porów ze względu na ich objętość – próbka 9114 podpróbka A ($K_p=2,52\%$)

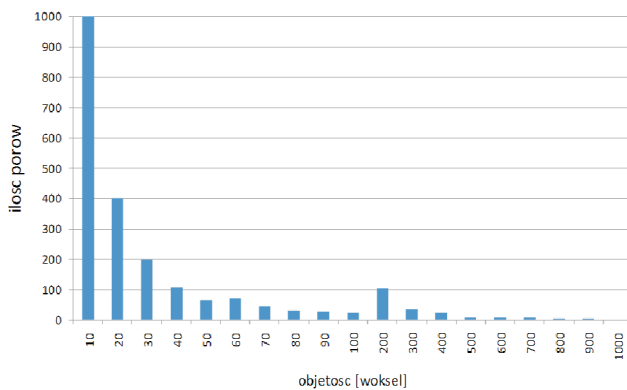
Po lewej – klasyfikacja porów do 1000 wokseli, po prawej – klasyfikacja porów powyżej 1000 wokseli

Rozpatrując otrzymane dla podpróbek 9114A i 9114B (rysunek 9 i 11) przedziały objętości sześciu największych podsieci, można stwierdzić, że w podpróbce A przeważają pory o objętości z zakresu 2000-3000 (4 podtypy) wokseli, natomiast w pod próbce B – z podobnego zakresu – 1500-3500 (4 podtypy) wokseli.

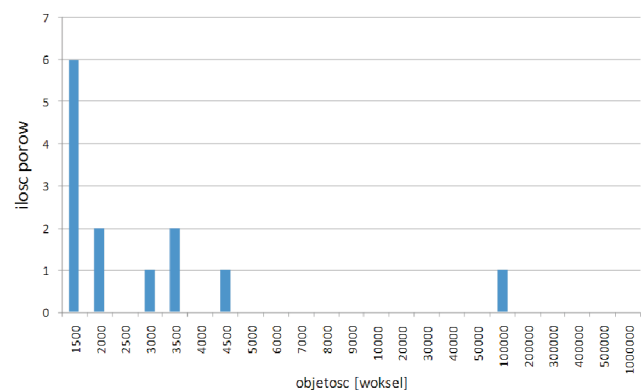
Analizując procentowy udział największych podsieci porów o objętości powyżej 1000 wokseli, wyraźnie widać ich znacznie większy udział w próbce o wyższej porowatości (9112), niż w próbce o niskiej porowatości (9114). Dla próbki 9112 około 6,1% stanowią pory o objętości powyżej 1000 wokseli, natomiast dla próbki 9114 jest to zaledwie około 0,2%.



Rys. 10. Wizualizacja sześciu największych podtypów porów – próbka 9114 podpróbka B



wartość pierwszej kolumny: 4377



wartość pierwszej kolumny: 6

Rys. 11. Klasyfikacja porów ze względu na ich objętość – próbka 9114 podpróbka B ($K_p=2,69\%$)

Po lewej – klasyfikacja porów do 1000 wokseli, po prawej – klasyfikacja porów powyżej 1000 wokseli

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Fragment prezentacji pt.: *Analiza 3D wewnętrznej przestrzeni porowej skał na podstawie obrazów mikrotomografii rentgenowskiej* – przedstawionej na Konferencji Naukowo-Technicznej „Ropa i gaz a skały klastyczne Polski”, Czarna 17-20 marca 2009 r.

Literatura

- [1] Arns C.H., Knackstedt, M.A., Pinczewski W.V., Martys N.S.: *Virtual permeametry on microtomographic images*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 45, p. 41-46, 2004.
- [2] Arns J.-Y., Arns C.H., Sheppard A.P., Sok R.M., Knackstedt M.A., Pinczewski W.V.: *Relative permeability from tomographic images; effect of correlated heterogeneity*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 39, p. 247-259, 2003.
- [3] Coles M.E., Hazlett R.D., Spanne P., Soll W.E., Muegge E.L., Jones K.W.: *Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 19, p. 55-63, 1998.
- [4] Coles M.E., Hazlett R.D., Muegge E.L., Jones K.W., Andrews A., Dowd B., Siddons P., Peskin A., Spanne P., Soll W.E.: *Developments in synchrotron X-ray microtomography with applications to flow in porous media*. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, vol. 1, p. 288-296, 1998.
- [5] Dohnalik M., Zalewska J.: *Zastosowanie mikrotomografii rentgenowskiej do rozwiązywania zagadnień geologicznych i geofizycznych*. Prace INiG Nr 157, 2009.
- [6] Lindquist, W.B., Venkatarangan, A., Dunsmuir, J., Wong, T.-f., 2000. Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones. Journal of Geophysical Research, v. 105, p. 21509-21527.
- [7] Lindquist W.B.: *3DMA-Rock, a software package for automated analysis of pore rock structure in 3D computed microtomography images*. 1999, Available from: http://www.ams.sunysb.edu/~lindquis/3dma/3dma_rock/3dma_rock.html.

- [8] Lindquist W.B., Venkatarangan A.: *Investigating 3D geometry of porous media from high resolution images*. Physics and Chemistry of the Earth (A), vol. 25, p. 593-599, 1999.
- [9] Lindquist W.B., Lee S.: *Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media*. Journal of Geophysical Research, vol. 101 (B4), p. 8297-8310, 1996.
- [10] Spanne P., Thorvert J.F., Jacquin C.J., Lindquist W.B., Jones W.B., Adler P.M.: *Synchrotron computed microtomography of porous media: topology and transports*. Physical Review Letters, vol. 73, p. 2001-2004, 1994.
- [11] Van Geet, M., Swennen R., Wevers M.: *Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography*. Sedimentary Geology, 132, 25-36, 2000.
- [12] Van Geet M., Lagrou D., Swennen R.: *Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (μ CT)*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 215, 51-60, 2003.
- [13] Wellington S.L., Vinegar H.J.: *X-ray computerized tomography*. Journal of Petroleum Technology, vol. 39, p. 885-898, 1987.
- [14] Wildenschild D., Hopmans J.W., Vaz C.M.P., Rivers M.L., Rikard D., Christensen B.S.B.: *Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions and limitations*. Journal of Hydrogeology, vol. 267, p. 285-297, 2002.
- [15] Zalewska J., Dohnalik M.: *Wyznaczenie krętości kanałów porowych metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej*. Nafta-Gaz Nr 12, 2009.



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych.



Mgr inż. Marek DOHNALIK – absolwent Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej. Pracownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie. Specjalizuje się w badaniach skał metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej.

ZAKŁAD GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Zakres działania:

- trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT);
- określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek skał i kamienia cementowego metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR);
- oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczenie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- interpretacja profilowań geofizycznych w zakresie oceny stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach wiertniczych;
- wyznaczenie kategorii zwiercalności skał na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej, w korelacji z fizyko-mechanicznymi i sprężystymi właściwościami rdzeni wiertniczych.

Kierownik: mgr inż. Jadwiga Zalewska

Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

Telefon: 12 653-25-12 wew. 132 lub 165

Faks: 12 650-67-70, 12 653-16-65

E-mail: jadwiga.zalewska@inig.pl

