

POMIARY POROWATOŚCI SKAŁ METODĄ RENTGENOWSKIEJ MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ (MICRO-CT)

Rock porosity measurements using Roentgen computed microtomography (Micro-CT)

Marek DOHNALIK & Jadwiga ZALEWSKA

*Instytut Nafty i Gazu;
ul. Lubicz 25a, 31-503 Kraków;
e-mail: dohnalik@inig.pl, zalewska@inig.pl*

Abstract: Roentgen computed microtomography is an imaging technique that generates high resolution 3D images of internal structure, basing on difference in X-rays absorption inside the sample. Micro-CT provides new possibilities to obtain up to few microns resolution images of reservoir rocks in non destructive way. Such images enables to visualize and quantitative analysis of mineral composition and pore structure (volume, shape and pore throat diameter), which can be used to better understanding petrophysical properties such as permeability. This paper shows test of direct, quantitative porosity measurement based on 3D images obtained using Benchtop device and AVIZO software.

Key words: porosity, microtomography

Słowa kluczowe: porowatość, mikrotomografia

WPROWADZENIE

Bezpośrednie pomiary charakterystyki przestrzeni porowej (do 1990 roku) były w znacznym stopniu ograniczone do stereologicznych badań na cienkich przekrojach (Lin & Cohen 1982, Koplik *et al.* 1984, Doyen 1988). Komputerowa analiza obrazów została wprowadzona w pracy Yanuka (1984). Oprogramowanie topologicznego mapowania porów zostało opisane przez MacDonalda (1986), a obliczenia dla próbki piaskowca Berea przedstawiono w artykule towarzyszącym (MacDonald *et al.* 1986). Oprogramowanie do identyfikacji porów i przewężeń porowych wykorzystujące serie kolejnych przekrojów 2D, zostało opisane przez Kwietnia *et al.* (1990). Wady metody cienkich przekrojów obejmują: duży nakład robocizny wymaganej do polerowania, cięcia, digitalizacji, niszczący dla próbki charakter tej techniki, oraz niemożność pomiaru wielkości wektorowych. Względnie niski koszt i prostota doświadczalna przekrojów 2D, plus zdolność do dokładnego pomiaru skalarnych wielkości geometrycznych (np. porowatość, wielkość powierzchni właściwej) dla homogenicznych, izotropowych mediów przyczyniają się do ciągłego stosowania tej techniki badawczej.

Technika odlewania porów (Wardlaw 1976) i porozymetria stopem Wooda (Dullien 1981, Myer *et al.* 1992) pozwoliła na bezpośrednią wizualizację 3D przestrzeni porowej, ale te pomiary ilościowe są wyjątkowo trudne do wykonania na odlewach bez niszczącego polerowania i cięcia, stąd te techniki znalazły tylko niewielkie zastosowania. Bezpośredni pomiar parametrów przestrzeni porowej uczynił milowy krok z pojawieniem się rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (Flannery *et al.* 1987, Spanne & Rivers 1987, Deckman *et al.* 1989, 1991, Kinney & Nichols 1992). Ta technika umożliwiła tworzenie w sposób nieniszczący trójwymiarowych obrazów próbek rdzeni skalnych, z jednorodną rozdzielczością we wszystkich trzech kierunkach. Pojawił się szereg opracowań (Kwiecien *et al.* 1990, Thovert *et al.* 1993, Coker & Torquato 1995, Lindquist *et al.* 1996, Lindquist & Venkatarangan 1999) podejmujących problem opracowania oprogramowania do analizy geometrycznej takich trójwymiarowych cyfrowych zbiorów danych.

W niniejszym artykule przedstawiono próbę bezpośredniego, ilościowego pomiaru porowatości na podstawie trójwymiarowych obrazów rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej, wykonanych aparatem Benchtop.

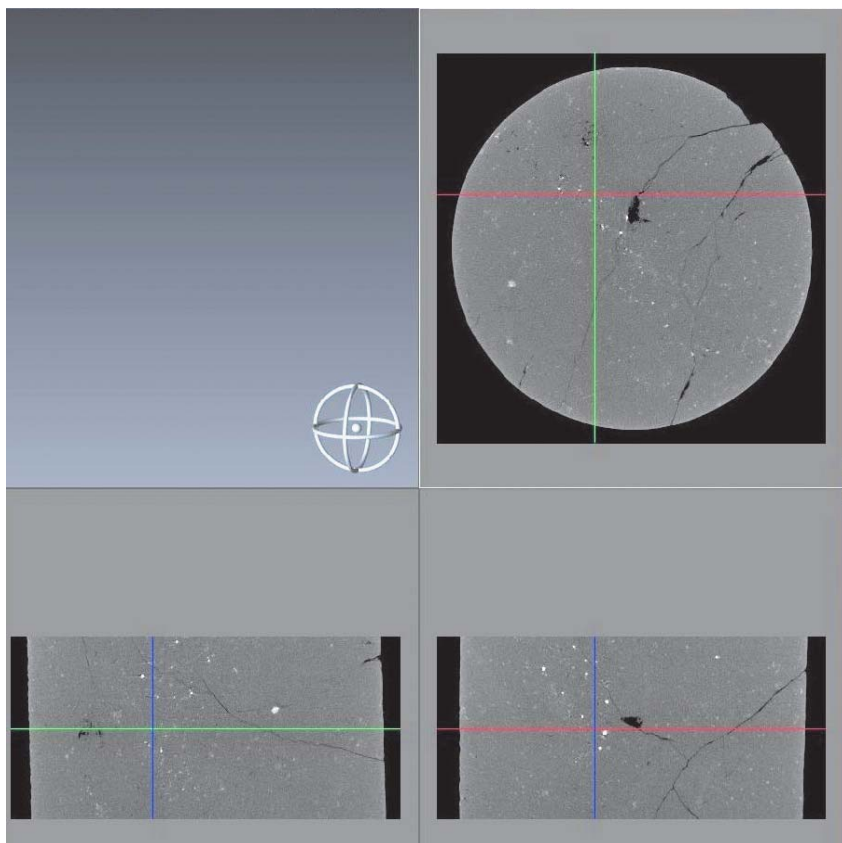


Fig. 1. Trzy prostopadłe względem siebie płaszczyzny przekroju próbki

Fig. 1. Three perpendicular cross sections of sample

WIZUALIZACJA DANYCH

Do wizualizacji i analizy wyników uzyskanych mikrotomografem rentgenowskim Benchtop służy program AVIZO, opracowany przez Mercury Computer Systems, Inc. Podstawowe funkcje tego programu pomagają poznać wewnętrzną strukturę próbki przez wydzielenie elementów o różnych wartościach pochłaniania promieniowania rentgenowskiego. Za ich pomocą można wyróżnić dowolną ilość obiektów z danego przedziału absorpcji promieniowania rentgenowskiego i w prosty sposób przedstawić przestrzenny rozkład porów w próbce skały oraz strukturę szkieletu skalnego. Omawiane oprogramowanie umożliwia przedstawienie obiektu za pomocą przekrojów wykonanych w 3 prostopadłych względem siebie kierunkach, jak to pokazano na figurze 1. W ten sposób można szybko „przeszukać” trójwymiarowy obraz, oglądając pojedyncze lub wielokrotne, prostopadłe, bądź skośne przekroje. W każdym z kierunków, w zależności od rozdzielczości, z jaką zostały wykonane projekcje, znajduje się od kilkudziesięciu do paru tysięcy takich przekrojów. Grubość każdej z tych warstw jest równa rozmiarowi woksela uzyskanego w danym kierunku. Na tak otrzymanych danych można wykonać wizualizacje oraz jakościowe i ilościowe analizy badanego obiektu, po uprzedniej segmentacji.

SEGMENTACJA OBRAZU

Najważniejszym procesem w ilościowej analizie obrazu tomograficznego, poza prawidłowym wykonaniem pomiaru i rekonstrukcji, jest segmentacja. Przydzielenie przedziału szarości analizowanemu obiektowi ma wpływ na otrzymywane później wartości liczbowe dotyczące tego obiektu. Aby móc liczbowo analizować przestrzeń porową próbki, należy wybrać próg wartości pochłaniania rozdzielaający przestrzeń porową i szkielet skały. Jest to zadanie dość proste, w przypadku gdy mamy do czynienia z materiałami w miarę jednorodnymi (np. wapienie). Natomiast dla materiałów heterogenicznych, takich jak np. piaskowce miocenne przedgórza Karpat, jest to zadanie bardzo trudne. Krytycznym krokiem jest zastosowanie właściwej wartości progowej, co stanowi najistotniejszy problem interpretacji ilościowej parametrów przestrzeni porowej (Van Geet *et al.* 2000, 2003) oraz rozkładu przestrzennego minerałów zawartych w skałach (np. Wellington & Vinegar 1987, Rivers *et al.* 1999).

Teoretycznie wartości pochłaniania promieniowania rentgenowskiego przez przestrzeń wypełnioną powietrzem (gęstość ok. 1.2 kg/m^3) są w przybliżeniu 2000 razy mniejsze niż wartości pochłaniania dla szkieletu skalnego (gęstość ok. 2500 kg/m^3). Ze względu na niejednorodną budowę ośrodka, oraz często bardzo małe rozmiary porów (mniejsze od rozdzielczości systemu) i artefakt (*partial volume artifact*) granice pomiędzy tymi wartościami zacierają się, tworząc płynne przejście pomiędzy dwoma ośrodkami.

Po ustaleniu wartości progowej pochłaniania należy wszystkie woksele o wartości pochłaniania mniejszej lub równej wartości progowej przypisać do etykiety, która będzie reprezentować porowatość, a wszystkie woksele powyżej tego progu będą przypisane do warstwy reprezentującej szkielet skalny. Na przekroju tak zdefiniowanego obszaru (Fig. 2) zaznaczone są obszary etykiety „porowatość” i „szkielet” – odpowiednio kolorem zielonym i niebieskim. Dla tak oznaczonej przestrzeni możliwe jest obliczenie objętości poszczególnych warstw, a następnie wyliczenie procentowego udziału każdej z warstw objętości próbki.

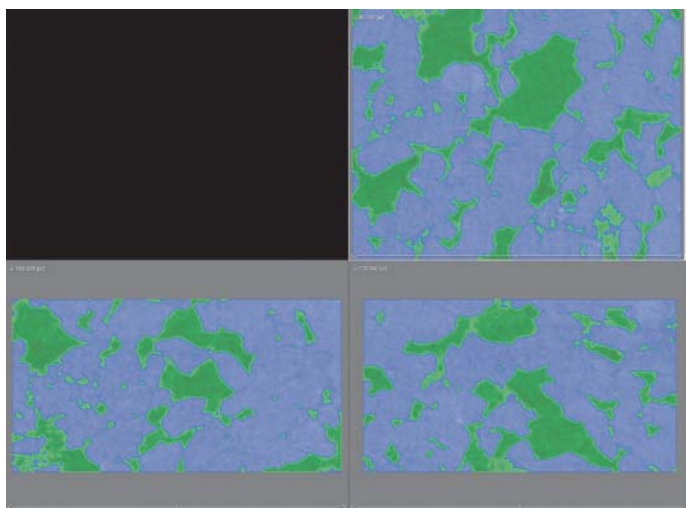


Fig. 2. Przekrój przez próbkę po wykonaniu segmentacji

Fig. 2. After segmentation cross section

Wynik obliczenia objętości poszczególnych warstw przedstawiany jest w postaci tabelarycznej i możliwy jest eksport tabeli do pliku tekstowego, celem późniejszej edycji danych w arkuszu kalkulacyjnym.

USTALANIE WARTOŚCI PROGOWEJ

W pierwszym kroku ilościowej analizy obrazu mikrotomografii rentgenowskiej określana jest wartość progowa micro-CT, rozdzielającą matrycę skalną od otaczającego powietrza. Rozkład wartości CT w zbiorze danych 3D pokazano na figurze 3. Występują dwa piki: dla powietrza otaczającego (0) i dla matrycy skalnej (58), które są przedstawione na histogramie. Ponieważ woksele mają skończone rozmiary, woksel na granicy faz matryca/powietrze zawiera zarówno matrycę o wysokiej gęstości, jak i powietrze o niskiej gęstości. W wyniku tego wartości CT wokseli na granicy faz leżą w zakresie pomiędzy 0 a 58, dając ciągłość wartości pomiędzy tymi dwoma pikami. Wartość progową wyznaczono jako punkt środkowy pomiędzy tymi pikami, w tym przypadku $(0+58)/2 = 29$ (Fig. 3).

Dla tak wyznaczonego progu wysegmentowano szkielet i przestrzeń porową badanej próbki. Wyliczona porowatość okazała się bardzo niska, wyniosła zaledwie 1.0%. Natomiast wartość zmierzona porozymetrem rtęciowym, dla gardzieli o średnicach 6μ i większych wyniosła 1.1%.

Zmierzona wartość porowatości (metodą porozymetrii rtęciowej) wyniosła 1.1% dając błąd oszacowania równy $(1.1-1.0)/1.1 \approx 9\%$. Na podstawie figury 3 można powiedzieć, że jeżeli przyjmie się wartość progową na poziomie 36, to uzyska się wartość porowatości, wynosząca równo 1.1%. Wartości progowe 29 i 36 znajdują się w niewielkiej odległości od siebie na histogramie (Fig. 3). Wyliczony błąd posiada dość wysoką wartość, dlatego też wciąż prowadzone są prace testowe nad udoskonalaniem tej metody.

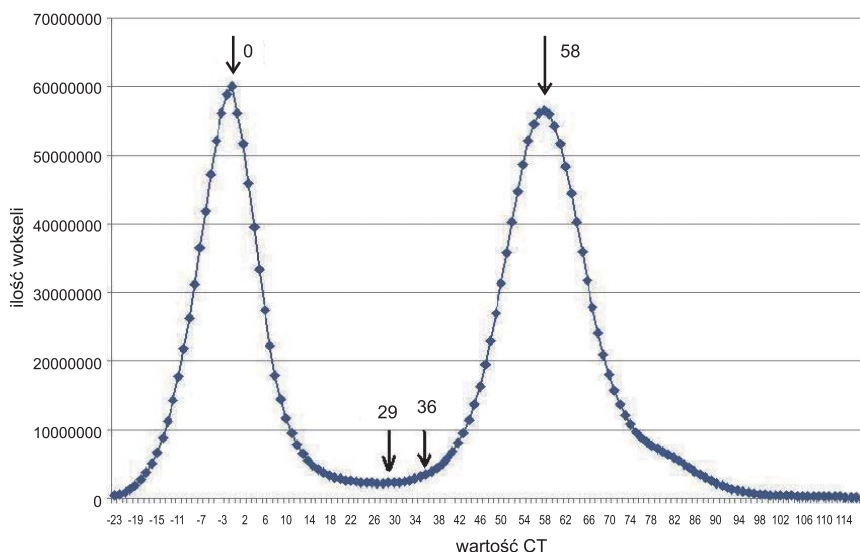


Fig. 3. Histogram wartości CT. Wskazano wartości pików dla rozkładu matrycy skalnej (58) oraz powietrza otaczającego (0)

Fig. 3. CT values histogram, with two peaks: rock matrix (58) and air (0)

OBRAZOWANIE I SZACOWANIE SZCZELIN

Po prawidłowym wydzieleniu przestrzeni porowej można przystąpić do szczegółowej analizy wewnętrznej struktury porowej lub szczelin występujących w skałach. Figura 4 przedstawia wygenerowane poszczególne warstwy, gdzie kolorem zielonym oznaczono przestrzeń porową, a kolorem niebieskim szkielet skalny. Na takich obrazach możliwe jest dokonanie dokładnego pomiaru średnicy kanałka porowego (Fig. 5a), lub w przypadku skał węglanowych zmierzenia szerokości szczeliny i kąta nachylenia szczeliny względem płaszczyzny próbki.

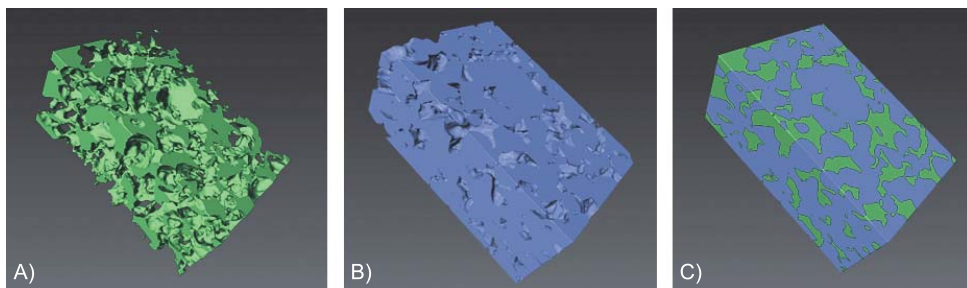


Fig. 4. Obrazy wygenerowanej powierzchni: A) przestrzeni porowej (kolor zielony); B) szkieletu skalnego (kolor niebieski); C) wycinka skały wraz z porami

Fig. 4. Generated surface images: A) pore structure (green color); B) rock matrix (blue color); C) rock frame and porosity

Na tak wygenerowanych powierzchniach można dokonywać pomiarów wielkości poszczególnych obiektów, czy rozwartości kątów w przestrzeni. Dla powyższych obrazów, po zdefiniowaniu rozmiaru woksela, program podaje rzeczywisty rozmiar obiektu z dokładnością do 0.01 μm oraz wartość kąta z dokładnością 0.1° (Fig. 5).

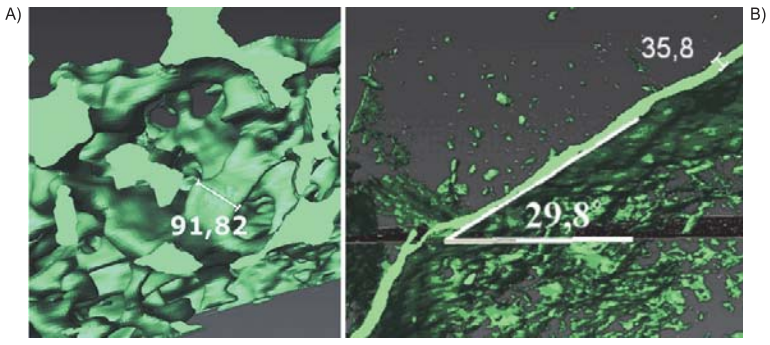


Fig. 5. Wizualizacja struktury porowej skały: A) piaskowiec – pomiar średnicy kanalka porowego (91.82 μm =0.092 mm); B) wapień – pomiar szerokości szczeliny i kąta nachylenia

Fig. 5. Visualization of pore structure: A) sandstone – pore channel diameter (91.82 μm =0.092 mm); B) limestone – crack width and crack angle measurement

Niestety, generowanie powyższych obrazów jest zadaniem bardzo obciążającym komputer, zatem zalecane jest tu stosowanie wygładzenia, co powoduje konieczność przefiltrowania dużej liczby małych obiektów, oraz wygładzenie powierzchni. Natomiast, jeżeli konieczne jest dokładne przedstawienie wszystkich obiektów, należy zmniejszyć wizualizowany obszar do około 500×500×500 wokseli.

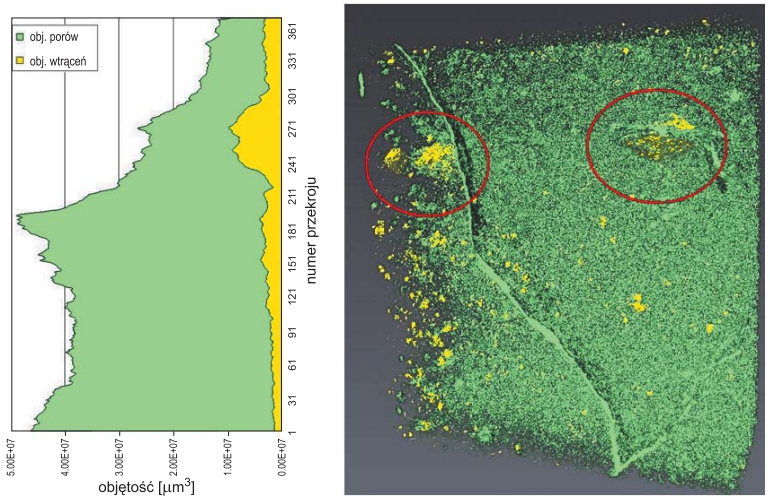


Fig. 6. Wewnętrzna struktura próbki skały węglanowej z zaznaczonymi gęstymi wtrąceniami (kolor żółty) oraz przestrzenią porową (kolor zielony)

Fig. 6. Internal structure of carbonate rock with dense inclusions (yellow) and pore space (green)

Program Avizo umożliwia też przedstawienie sumarycznej objętości danej warstwy dla każdego z przekrojów. Na figurze 6, po prawej stronie przedstawiona jest wewnętrzna struktura próbki skały, gdzie kolor żółty obrazuje gęste wtrącenia, natomiast kolor zielony szczeliny i pory. Po lewej stronie tej figury znajduje się wykres przedstawiający sumę objętości poszczególnych warstw (przestrzeń porowa, wtrącenia) dla każdego przekroju próbki, w zakresie 1÷361.

Figura 6 pokazuje zgodność pomiędzy wartościami liczbowymi a obrazem. Powyższy wykres został dopasowany rozmiarem do obrazu wewnętrznej struktury skały. Porównując sumę wtrąceń (kolor żółty) przedstawioną na wykresie z obrazem po prawej stronie wyraźnie widać, że maksymalne wartości na wykresie odpowiadają obszarom oznaczonym czerwonymi obwiedniami na obrazie tomograficznym.

PODSUMOWANIE

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa to najnowsze osiągnięcie techniczne, które otwiera nowe obszary w badaniach geologicznych. Ważną jej zaletą jest nieniszczący charakter badań oraz możliwość wizualizacji obiektu w trzech wymiarach. Posiada też możliwość wybierania próbek, które można badać w celu uzyskania danych o najwyższej rozdzielczości. Obecnie najwyższa rozdzielczość dla próbek o średnicy 1 cm, to 6 μm .

Co więcej, za pomocą aparatu Benchtop (INiG, Kraków) można wykonać pomiary ilościowe, które pozwolą na dokładniejsze rozpoznanie struktur porowych, umożliwią poszerzenie wiedzy nt. przestrzennej dystrybucji porów, długości i krętości kanalików porowych oraz przepuszczalności i szczelinowatości skał – co będzie przedmiotem kolejnych prac.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Coker D.A. & Torquato S., 1995. Extraction of morphological quantities from a digitized medium. *Journal of Applied Physics*, 77, 955–964.
- Deckman H.W., D'Amico K.L., Dunsmuir J.H., Flannery B.P. & Gruner S.M., 1989. Microtomography detector desing. *Advanced X-ray Analysis*, 32, 641–650.
- Deckman H.W., Dunsmuir J.H., D'Amico K.L., Flannery B.P. & Ferguson S.R., 1991. Development of quantative x-ray microtomography. *Materials Research Society Symp. Proc.*, 217.
- Doyen P.M., 1988. Permeability, conductivity and pore geometry of sandstone. *Journal of Geophysical Research*, B93, 7729–7740.
- Dullien F.A.L., 1979. *Porous Media, Fluid Transfer and Pore Structure*. Academic Press, New York, 1–150.
- Flannery B.P., Deckman H.W., Roberge W.G. & D'Amico D., 1987. Three-dimensional x-ray microtomography. *Science*, 237, 1439–1444.
- Kinney J.H. & Nichols M.C., 1992. X-ray tomographic microscopy (XTM) using synchrotron radiation. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 22, 121–152.

- Koplik J., Lin C. & Vermette M., 1984. Conductivity and permeability from microgeometry. *Journal of Applied Physics*, 56, 3127–3131.
- Kwiecien M.J., MacDonald I.F. & Dullien F.A.L., 1990. Three-dimensional reconstruction of porous media from serial section data. *Journal of Microscopy*, 159, 343–359.
- Lin C. & Cohen M.H., 1982. Quantative methods for microgeometric modeling. *Journal of Applied Physics*, 53, 4152–4165.
- Lindquist W.B., Lee S.M., Coker D.A., Jones K.W. & Spanne P., 1996. Medial axis analysis of three dimensional tomographic image of drill core samples. *Journal of Geophysical Research*, 101B, 8297–8310.
- Lindquist W.B. & Venkatarangan A., 1999. Investigating 3D geometry of porous media from high resolution image. *Physics and Chemistry of the Earth – Elsevier (A)*, 25, 593–599.
- Myer L.R., Kemeny J., Cook N.G.W., Ewy R., Suarez R. & Zhang Z., 1992. Extensile cracking in porous rock under differential compressive stress. *Applied Mechanics Reviews*, 45, 263–280.
- MacDonald I.F., Kaufmann P.M. & Dullien F.A.L., 1986. Quantative image analysis of finite porous media. I. Development of genus and pore map software. *Journal of Microscopy*, 144, 277–296.
- MacDonald I.F., Kaufmann P.M. & Dullien F.A.L., 1986. Quantative image analysis of finite porous media. II. Specific genus of cubic lattice model and Barea sandstone. *Journal of Microscopy*, 144, 277–296.
- Rivers M., 1999. *Tutorial Introduction to X-ray Computed Microtomography Data Processing*. University of Chicago.
- Spanne P. & Rivers M.L., 1987. Computerized microtomography using synchrotron radiation from the NSLS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B24/25, 1063–1067.
- Thovert J., Salles J. & Adler P.M., 1993. Computerized characterization of the geometry of real porous media: their discretization, analysis and interpretation. *Journal of Microscopy*, 170, 65–79.
- Wardlaw N.C., Taylor R.P., 1976. Mercury capillary pressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behavior of reservoir rocks. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 24, 225–262.
- Wellington S.L. & Vinegar H.J., 1987. X-ray computerized tomography. *Journal of Petroleum Technology*, 885–898.
- Van Geet M., Swennen R. & Wevers M., 2000. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geology*, 132, 25–36.
- Van Geet M., Lagrou D. & Swennen R., 2003. Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (μ CT). *Geological Society, London, Special Publications*, 215, 51–60.
- Yanuka M., Dullien F.A.L. & Elrick D.E., 1984. Serial sectioning and digitization of porous media for two and three-dimensional analysis and reconstruction. *Journal of Microscopy*, 135, 159–168.