

**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2009/

Kraków, grudzień 2009

Raport Nr 2034/AP

**Metoda mikrotomografii komputerowej dla układu
mikrowiązki promieniowania X w zastosowaniu do
wyznaczania porowatości i powierzchni właściwej skał**

Jakub Bielecki, Sebastian Bożek¹, Janusz Lekki,
Zbigniew Stachura, Jadwiga Jarzyna², Wojciech M. Kwiatek

¹ IFJ PAN oraz Uniwersytet Jagielloński, Wydział Farmaceutyczny Collegium Medicum, Zakład Farmakokinetyki i Farmacji Fizycznej, ul. Medyczna 9, Kraków.

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

Streszczenie:

Celem pracy było opracowanie metodyki pomiarów wybranych własności fizycznych próbek geologicznych metodą mikrotomografii komputerowej. Badania zostały wykonane w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN z wykorzystaniem układu mikrowiązki promieniowania X przy współpracy z Katedrą Geofizyki WGGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Przedstawione zostały wstępne wyniki pomiarów porowatości i powierzchni właściwej przestrzeni porowych dla próbki skały piaskowca wydobytego z otworu CG5 na głębokości 2680 m. Omówiona została metoda segmentacji obrazów tomograficznych oraz algorytmy cyfrowej analizy danych tomograficznych.

Praca przedstawia możliwości zastosowania metody mikrotomografii komputerowej o wysokiej przestrzennej zdolności rozdzielczej w połączeniu z metodami cyfrowej analizy danych do badania materiałów porowatych.

Abstract:

This paper presents the methodology of the particular physical properties measurements of geological samples of porous rock by means of the x-ray computed microtomography method. Measurements have been carried out with the use of X-ray microbeam facility at the Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, in cooperation with Department of Geophysics, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, AGH University of Science and Technology in Krakow. The preliminary results of the measurements of the porosity and specific surface area of pores of the sandrock sample, extracted from a drill hole at 2680 m depth, are presented. The method of tomographic images segmentation and other methods of tomographic image analysis have been discussed.

The possibilities of high spatial resolution computed microtomography, combined with the digital data analysis methods for porous media, have been presented.

1. Wstęp

Wyznaczenie fizycznych własności geologicznych materiałów porowatych ma kluczowe znaczenie dla jednostek przemysłu naftowego. Wiedza na temat tych materiałów jest uzyskiwana najczęściej z pomiarów porowatości, rozkładu rozmiarów porów, przepuszczalności hydrodynamicznej itp., wykonywanych w warunkach laboratoryjnych na wcześniej pobranych próbkach lub na podstawie profilowań geofizyki otworowej w warunkach in situ.

Korzyści płynące z rozwoju metod cyfrowej analizy obrazów oraz metod symulacji dynamiki płynów stwarzają obecnie obiecujące perspektywy przewidywania fizycznych własności materiałów porowatych na podstawie znajomości trójwymiarowej struktury geometrycznej materiału. Trójwymiarowy model struktury materiału porowatego może być uzyskany za pomocą dwóch metod: stochastycznego modelowania mikrostrukturalnego (stochastic microstructural modeling SMM) lub bezpośredniego obrazowania struktury materiału. Pierwsza z metod oparta jest o pomiar geometrycznych i topologicznych własności materiału porowatego na podstawie dwuwymiarowych obrazów uzyskanych za pomocą mikroskopu optycznego lub elektronowego. Modele stochastyczne są wówczas użyte do wygenerowania trójwymiarowych struktur przestrzeni porowych. Modelowanie stochastyczne jest interesującym podejściem, ponieważ umożliwia ono uzyskanie wyników w krótkim czasie. Jednakże podejście to jest zawodne w przypadku długich kanałków porowych o skomplikowanym systemie połączeń [1]. Drugie podejście wykorzystuje metodę mikrotomografii komputerowej o wysokiej przestrzennej zdolności rozdzielczej [2] [3]. Badania tego typu mogą być wykonywane przy użyciu promieniowania synchrotronowego lub za pomocą układów pomiarowych z laboratoryjnym źródłem promieniowania.

Zaletą zastosowania metody mikrotomografii komputerowej do uzyskania trójwymiarowej struktury geometrycznej badanego materiału jest możliwość zastosowania uzyskanych wyników do komputerowej symulacji dynamiki cieczy w badanym materiale w oparciu o fundamentalne prawa fizyki. Wyniki tego typu symulacji pomagają w lepszym określeniu własności fizycznych badanego materiału.

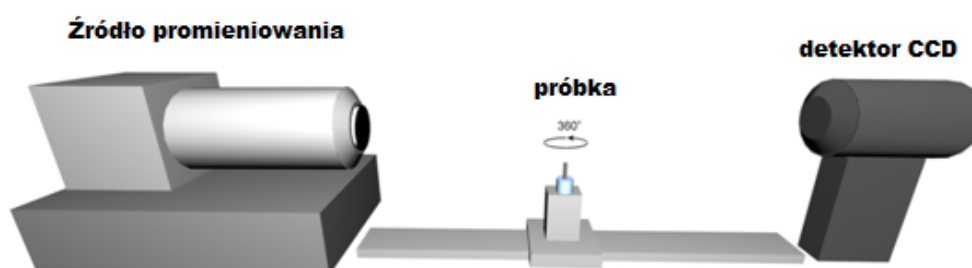
2. Pomiary mikrotomograficzne

Pomiary metodą mikrotomografii komputerowej zostały wykonane dla próbki skały piaskowca wydobytego z otworu CG5 na głębokości 2679,6 m (piaskowiec średnioziarnisty, szczeliny zabliznione kalcytem). Próbka miała rozmiary liniowe rzędu milimetrów i zawierała wystarczającą ilość substancji, aby można było wyznaczyć jej własności fizyczne (patrz rozdział 4).

Aparatura pomiarowa składała się z:

- Źródła promieniowania (lampa rentgenowskiej Hamamatsu L9191 z mikroogniskowaniem),
- Precyzyjnego goniometru oraz uchwytu na próbkę,
- Kamery CCD czulej na promieniowanie rentgenowskie (Photonic Science FDI VHR 70),
- Komputerów sterujących z zainstalowanym specjalistycznym oprogramowaniem.

Rys. 1 przedstawia uproszczony schemat linii pomiarowej.



Rysunek 1. Schemat aparatury pomiarowej wykorzystanej do analizy próbek metodą mikrotomografii komputerowej.

Do pomiarów zostało użyte promieniowanie rentgenowskie emitowane ze srebrnej anody przy napięciu przyspieszającym 65 kV i prądzie anodowym 14 μ A. Czas ekspozycji dla pojedynczej projekcji wynosił 12 s. Obrazy tomograficzne poszczególnych próbek zostały zrekonstruowane za pomocą algorytmu wstecznej projekcji (filtered backprojection algorithm) z 600 projekcji o rozdzielczości 1000x666 pixeli. Dla każdej projekcji dokonano korekcji niejednorodności czułości matrycy CCD (flat field) oraz minimalizacji wpływu termicznej generacji elektronów w matrycy CCD (dark current). Artefakty w postaci koncentrycznych pierścieni na zrekonstruowanych obrazach tomograficznych (ring artefacts),

wynikające z niejednakowej czułości poszczególnych pixeli matrycy CCD, zostały usunięte poprzez cyfrową obróbkę danych.

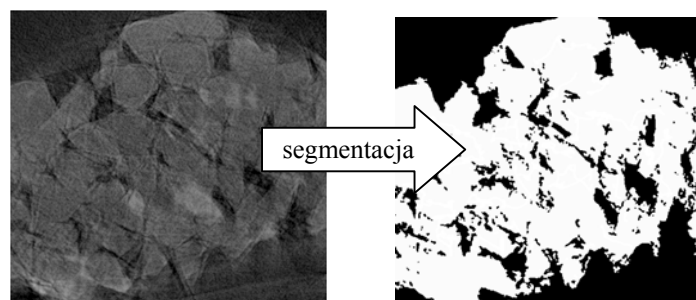
3. Segmentacja obrazów tomograficznych

Obrazy tomograficzne reprezentują stopień osłabienia promieniowania X, które zachodzi w małym elemencie przestrzeni zwanym voxelem (ang. volumetric element). Liniowy współczynnik osłabienia prezentuje się zwykle na obrazach tomograficznych w skali odcieni szarości. Jeśli w obrębie jednego voxela znajduje się tylko jedna substancja, obraz tomograficzny reprezentuje liniowy współczynnik osłabienia tej substancji. Jeśli więcej niż jeden materiał (np. skała i powietrze) jest obecny w objętości jednego voxela, wtedy obraz tomograficzny reprezentuje uśrednioną wartość współczynników osłabienia tych substancji, co w efekcie daje pośrednią wartość w skali szarości na obrazie tomograficznym, zatem wprowadza rozmycie. Jest to tzw. partial volume effect. Na ten efekt nakłada się efekt rozmycia spowodowany skończoną zdolnością rozdzielczą układu pomiarowego. W wyniku tych efektów obraz tomograficzny każdego obiektu ulega lekkiemu rozmyciu.

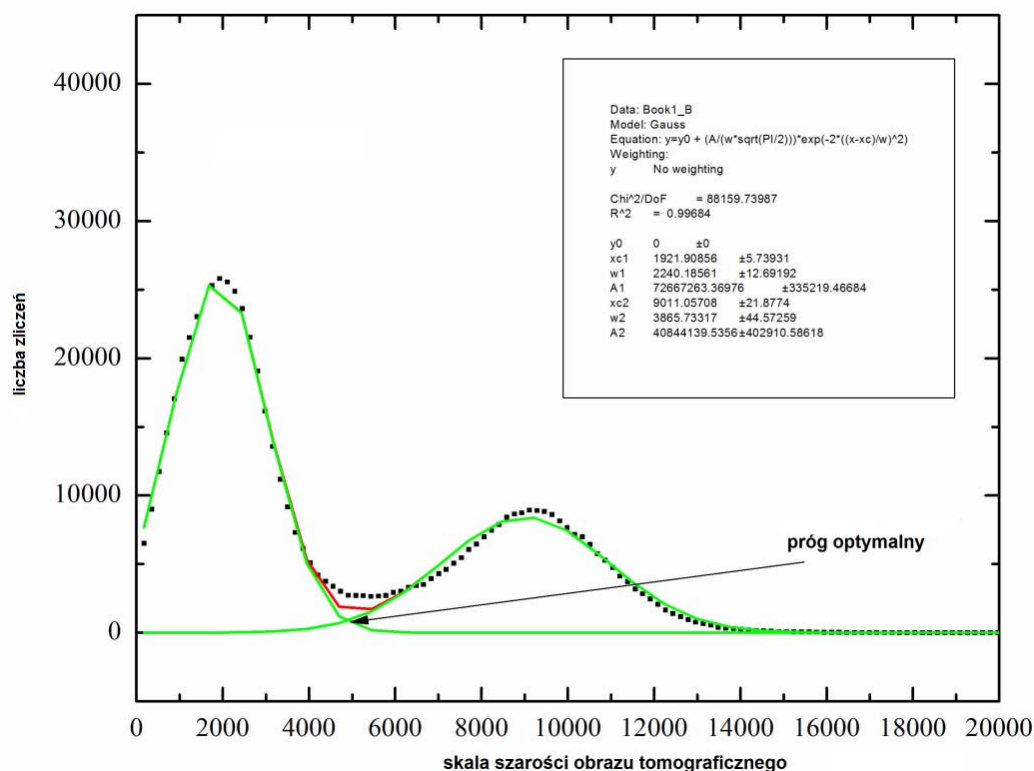
Proces segmentacji, czyli rozróżnienia przestrzeni porowej od przestrzeni zajmowanej przez matrycę materiału, polega na przypisaniu binarnych wartości każdemu voxelowi obrazu tomograficznego. Zakładamy, że przestrzeni zajmowanej przez matrycę przypisujemy wartości 1 (kolor biały), a wolnej przestrzeni porów wartość 0 (kolor czarny).

Wybór wartości progu oparty jest o kształt histogramu, którego dwa piki reprezentują odpowiednio przyczynki od powietrza i matrycy. Piki te nie są zwykle dobrze rozdzielone.

Procedura znajdowania odpowiedniej wartości progu polega na dopasowaniu do punktów histogramu sumy dwóch funkcji Gaussa i znalezieniu punktu przecięcia tych dwóch indywidualnych funkcji (patrz rys. 3). Taka procedura umożliwia znalezienie optymalnej wartości progu segmentacji [4].



Rysunek 2. Przykład segmentacji zrekonstruowanego obrazu tomograficznego. Pixele reprezentujące wartość liniowego współczynnika osłabienia większego niż znaleziona wartość progowa oznaczone są kolorem białym i przypisane są do matrycy. Pixele reprezentujące wartość współczynnika osłabienia mniejszą niż wartość progowa reprezentują przestrzeń porową – kolor czarny.



Rysunek 3. Przykład znajdowania wartości progowej wykorzystanej do procesu segmentacji obrazu tomograficznego. Histogram zawiera dwa piki reprezentujące przyczynki od przestrzeni porowej i matrycy. Dopasowanie sumy dwóch funkcji Gaussa do mierzonego sygnału umożliwia znalezienie optymalnej wartości progu.

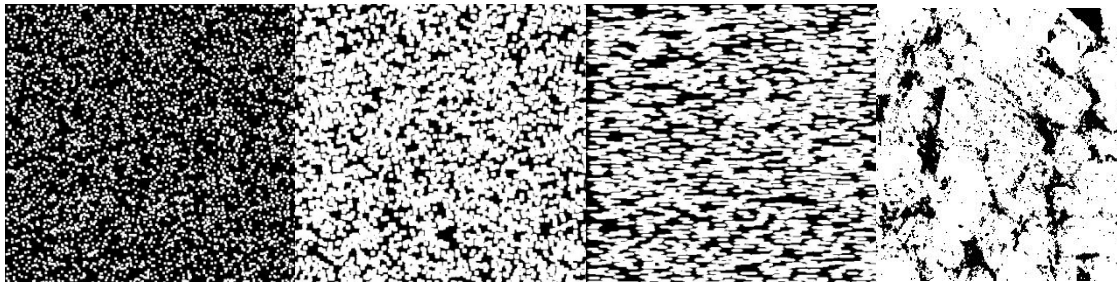
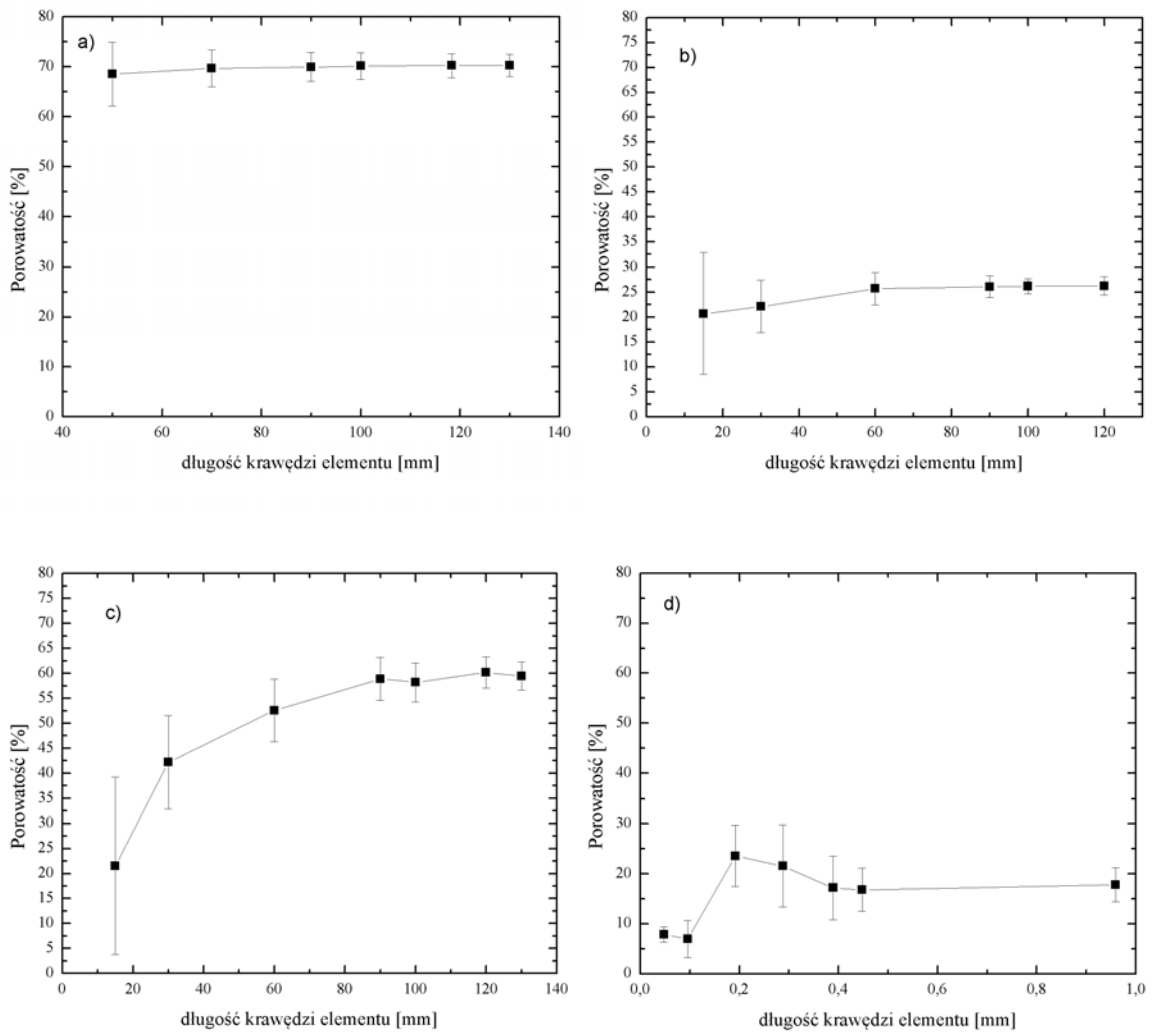
4. Objętość reprezentatywna REV (Representative Elementary Volume)

Zrekonstruowane obrazy tomograficzne stanowią dane pomiarowe o rozmiarach rzędu setek megabajtów. Wizualizacja oraz dalsza analiza tak dużej ilości danych jest bardzo trudna lub w niektórych przypadkach niemożliwa. Z tego powodu, z całości danych pomiarowych wybiera się najczęściej tylko odpowiednie części, które poddawane są dalszej analizie. Jest to jednoznaczne z wybraniem pewnego elementu przestrzeni na zrekonstruowanym rozkładzie współczynnika absorpcji, na podstawie którego będą wyznaczane poszczególne własności badanego obiektu.

W przypadku materiałów porowatych należy zadbać, aby wybrany element objętości oddawał wszystkie cechy całości badanego materiału. Pomocne jest tu pojęcie objętości reprezentatywnej (ang. Representative Elementary Volume) REV, która jest najmniejszym elementem objętości, który można użyć do pomiaru wielkości charakteryzujących badany materiał, tak, aby wielkości te były zgodne z wielkościami mierzonymi w całej objętości badanej próbki.

Rozważmy zagadnienie objętości reprezentatywnej na przykładzie wyznaczania porowatości próbki. Jeśli losowo wybrany element przestrzeni jest zbyt mały, oszacowana na jego podstawie porowatość może być zaniżona lub zawyżona i nie oddaje on wiernie cech całości próbki. Mówimy wtedy, że wybrany element nie jest reprezentatywny. Konieczne w takim przypadku jest wybranie większego elementu w celu wyznaczenia właściwej wartości porowatości próbki.

Rysunek 4 przedstawia porowatość kilku sztucznie wymodelowanych struktur porowatych oraz porowatość badanej próbki piaskowca w funkcji rozmiarów badanego elementu. Wyniki obliczeń porowatości zbiegają asymptotycznie do wartości najbardziej prawdopodobnej. Umożliwia to oszacowanie minimalnego rozmiaru elementu, na podstawie którego można wnioskować o własnościach całej próbki. Równocześnie, wraz ze wzrostem rozmiarów badanego elementu obrazu poprawia się statystyka pomiaru, co powoduje zmniejszanie się niepewności pomiarowej wyznaczenia porowatości próbki.



a)

b)

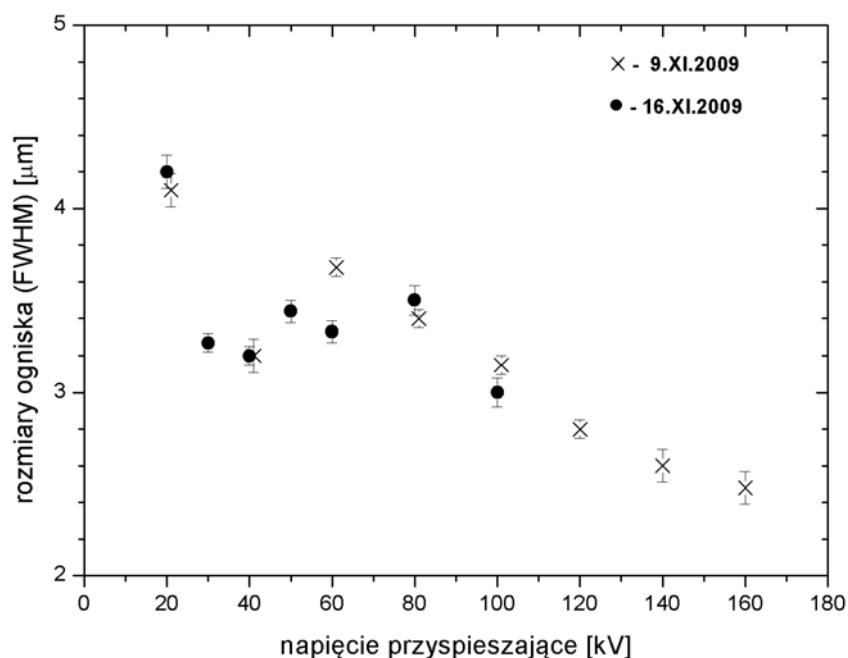
c)

d)

Rysunek 4. Porowatość kilku przykładowych struktur w funkcji rozmiarów badanego elementu.

5. Dyskusja jakości uzyskanych obrazów tomograficznych.

O jakości otrzymanych obrazów tomograficznych badanych próbek decydują w głównej mierze dwa czynniki: i) przestrzenna zdolność rozdzielcza układu pomiarowego, ii) występowanie artefaktów na zrekonstruowanych obrazach tomograficznych. Pierwszy z czynników zależy głównie od rozmiarów obszaru, z którego emitowane jest promieniowanie, czyli rozmiarów ogniska lampy rentgenowskiej oraz wielkości pojedynczego elementu matrycy CCD (pixela). Rysunek 5 przedstawia zmierzone rozmiary ogniska źródła promieniowania w funkcji napięcia przyspieszającego. Na drugi z czynników składają się takie efekty jak wcześniej wymieniony „partial volume effect”, efekt utwardzania wiązki (beam hardening effect), błędy geometrii układu oraz wspomniane artefakty w formie koncentrycznych pierścieni (ring artefacts) [5].

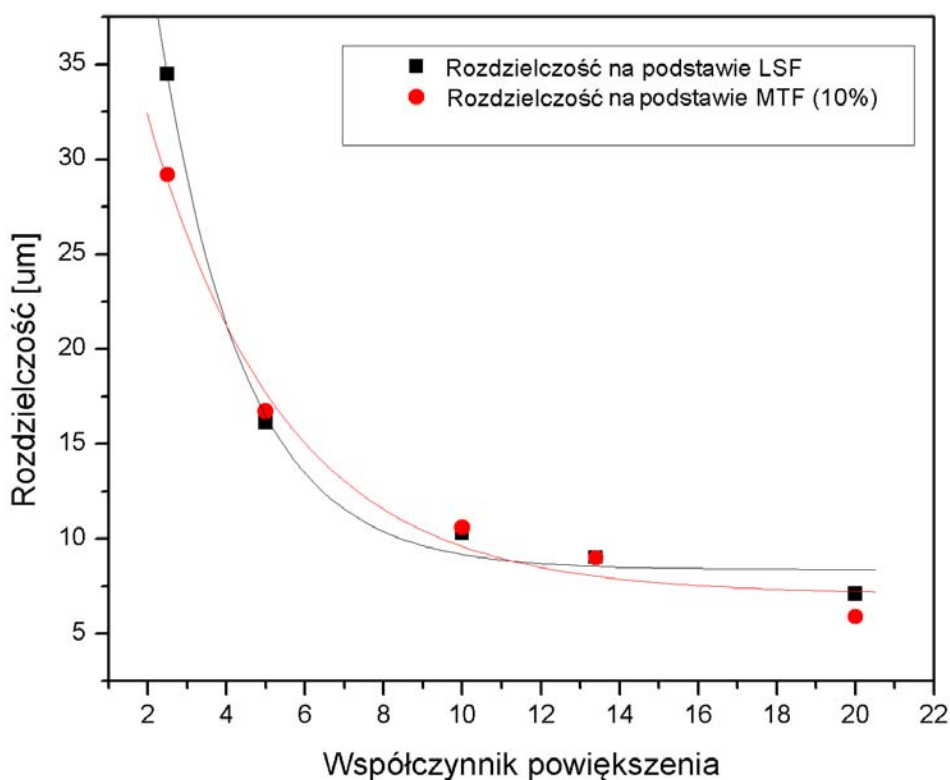


Rysunek 5. Rozmiary ogniska lampy rentgenowskiej Hamamatsu L9191 w funkcji wartości napięcia przyspieszającego.

Użytecznymi narzędziami, które opisują w jaki sposób układ pomiarowy odwzorowuje obrazowany obiekt są: funkcja rozmycia liniowego (ang. line spread function LSF) oraz funkcja transferu modulacji (ang. modulation transfer function MTF). Funkcja transferu modulacji może być eksperymentalnie wyznaczona na kilka sposobów [6]. W tej pracy MTF została obliczona na podstawie znajomości LSF. Funkcja rozmycia liniowego jest pochodną z sygnału będącego odpowiedzią układu pomiarowego na obraz ostrej krawędzi. Szerokość LSF podaje się najczęściej jako szerokość połówkową. Funkcja transferu modulacji jest to funkcja rozmycia liniowego wyrażona w przestrzeni częstości (np. przy użyciu szybkiej

transformacji Fouriera). MFT dostarcza informacji na temat, jak bardzo poszczególne częstotliwości są pochłaniane przez układ obrazujący.

Rysunek 6 przedstawia zależność rozdzielczości przestrzennej układu pomiarowego wyznaczonej, jako szerokość połówkowa LSF oraz jako odwrotność częstości, przy której $MFT = 10\%$, w funkcji współczynnika powiększenia [7]. Pomiary zostały wykonane przy napięciu przyspieszającym lampy równym 70 kV. Dla współczynnika powiększenia powyżej 16 zdolność rozdzielcza układu wynosi około $10 \mu\text{m}$.



Rysunek 6. Rozdzielczość przestrzenna układu pomiarowego w funkcji współczynnika powiększenia.

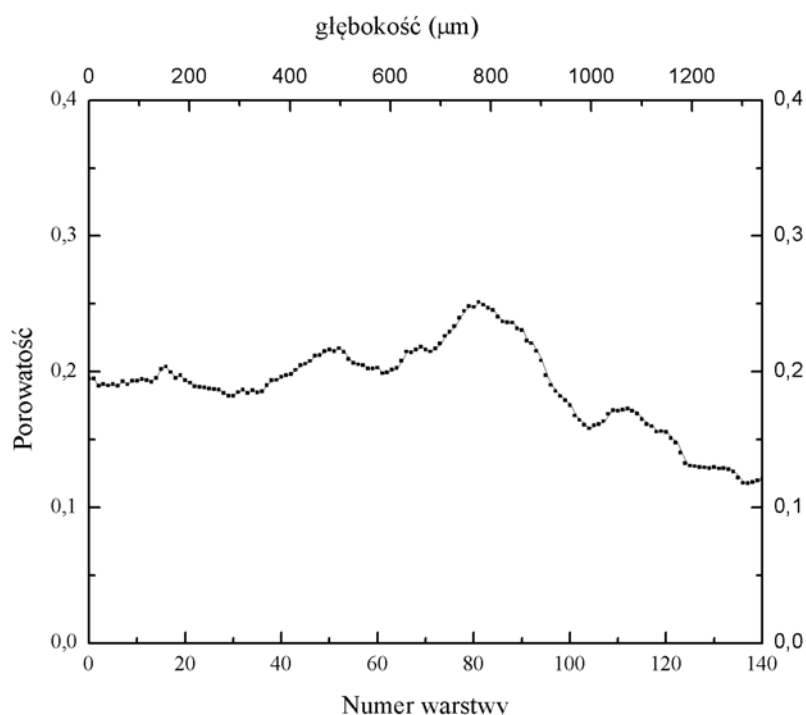
6. Obliczanie porowatości

Po dokonaniu segmentacji obrazu tomograficznego możliwe jest wyznaczenie porowatości badanej próbki. Porowatość próbki zdefiniowana jest jako stosunek objętości pustych przestrzeni porowych do całkowitej objętości próbki:

$$\Phi = \frac{V_V}{V_T} = \frac{V_V}{V_V + V_R},$$

gdzie V_V – oznacza objętość przestrzeni porowej, V_T – całkowitą objętość próbki, V_R – objętość przestrzeni zajmowanej przez matrycę (skałę).

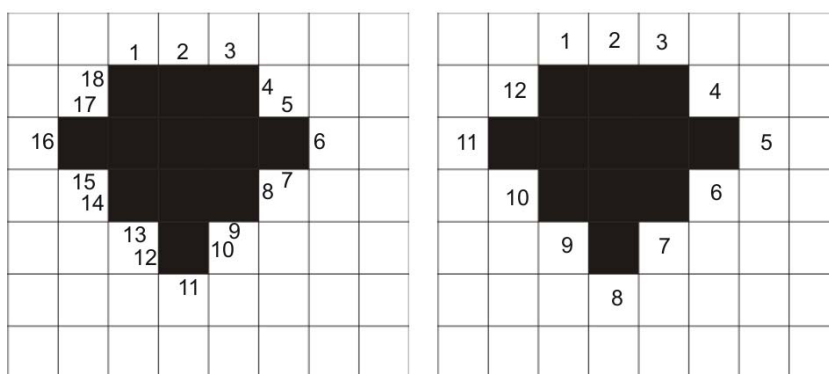
Obliczenie porowatości polega na zliczaniu dla każdej warstwy pixeli reprezentujących przestrzeń porową oraz pixeli reprezentujących matrycę. Rysunek 7 przedstawia wyniki pomiarów porowatości badanej próbki dla 140 warstw. Wartość średnia porowatości próbki zmierzona metodą mikrotomografii komputerowej wynosi 0.187 ± 0.034 . Pomiar porowatości metodą porozymetrii rtęciowej dały wynik 0.153. Rozbieżność w tych wartościach może być spowodowana występowaniem w próbce mikroszczelin, które mogą zawyżyć wartość porowatości mierzonej metodą mikrotomografii komputerowej.



Rysunek 7. Porowatość badanej próbki wyznaczona na podstawie 140 zrekonstruowanych warstw.

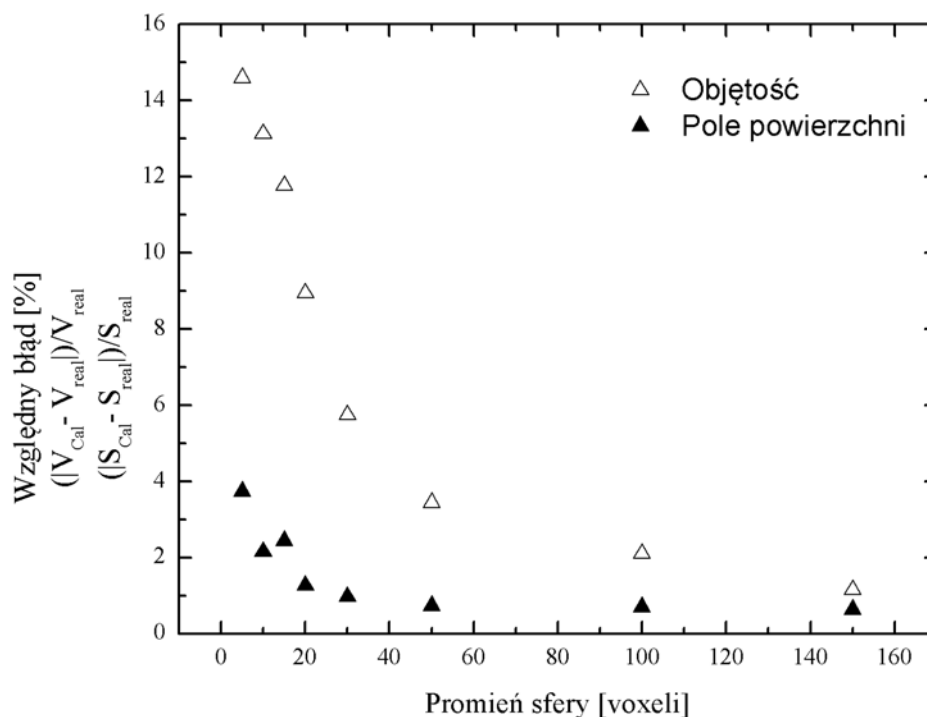
7. Obliczanie pola powierzchni przestrzeni porowych

Powierzchnia nieregularnych kształtów porów może być obliczona dwiema metodami [8]. W metodzie pierwszej, dla każdej zrekonstruowanej warstwy zliczane są wszystkie boki voxelów o wartości 1 bezpośrednio sąsiadujące z voxelami reprezentującymi pustą przestrzeń porową. W drugiej metodzie zliczane są wszystkie voxele o wartości 0 bezpośrednio sąsiadujące z voxelami matrycy (rys. 8). W prezentowanej pracy zdecydowano się użyć metody drugiej, ponieważ dla nieregularnych brył jest ona zazwyczaj bardziej dokładna (tzn. daje mniejsze błędy wynikające z dyskretnej natury obrazu tomograficznego) [8].



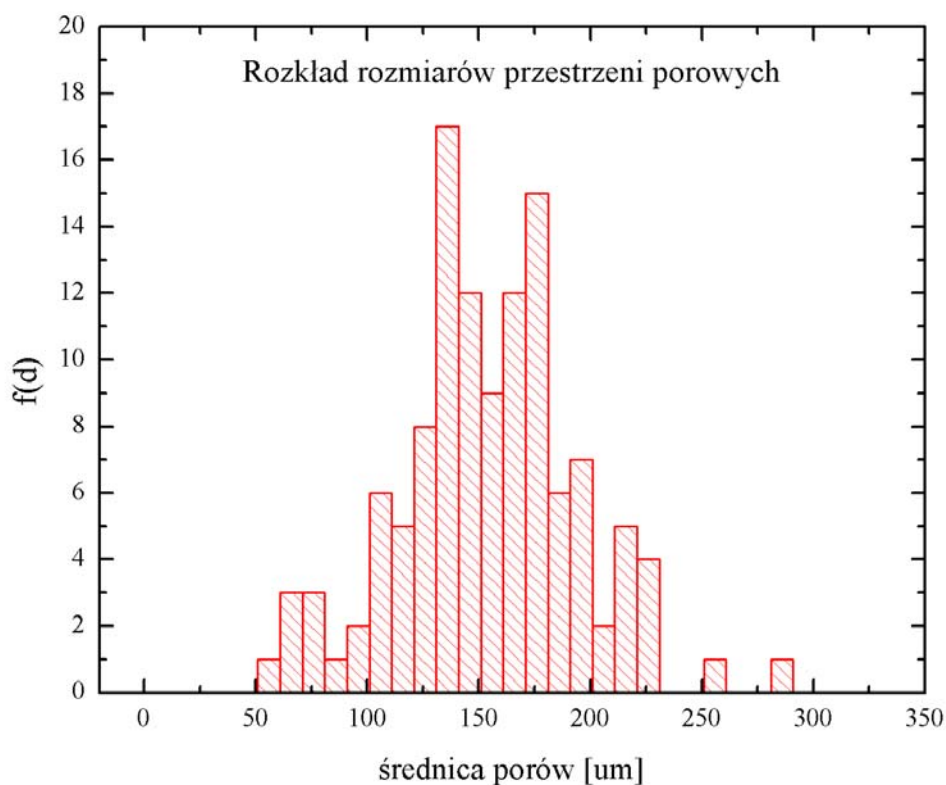
Rysunek 8. Ilustracja dwóch metod obliczania powierzchni przestrzeni porowej. W metodzie pierwszej (ilustracja z lewej strony) zliczane są wszystkie boki voxelów o wartości 1 sąsiadujących bezpośrednio z voxelami o wartości 0. W metodzie drugiej zliczane są voxele o wartości 0 sąsiadujące z voxelami o wartości 1. Do wyznaczenia powierzchni przestrzeni porowej wybrana została metoda druga, ponieważ dla brył o nieregularnych kształtach daje ona mniejszą niepewność pomiaru.

Niepewność wyznaczenia zarówno porowatości jak i powierzchni przestrzeni porowych zależy od kształtu porów materiału. Niepewność ta jest większa dla obiektów o dużej krzywiznie powierzchni. Niepewność wyznaczenia porowatości i powierzchni porów zależy również od liczby voxelów modelujących dany obiekt. W celu wyznaczenia niepewności związanych z dyskretną naturą obrazów tomograficznych oraz oszacowania minimalnej ilości voxelów, które powinny tworzyć przestrzeń porową, wykonano szereg obliczeń objętości i powierzchni sfer o różnych promieniach. Rysunek 9 przedstawia podsumowanie wyników testu. Aby niepewność wyznaczenia objętości i przestrzeni porów utrzymywała się na poziomie kilku procent, pojedyncza przestrzeń porowa powinna być modelowana obiektem składającym się z odpowiedniej liczby voxelów. W uproszczonym przypadku, gdy powierzchnie porowe modelowane są sferami, każda ze sfer powinna mieć średnicę minimalnie 20 voxelów. Wysoka rozdzielczość przestrzenna uzyskanych obrazów tomograficznych zapewnia małą niepewność pomiarową wynikającą z dyskretnej natury modelu materiału porowatego.



Rysunek 9. Względna niepewność pomiarowa oszacowania objętości i powierzchni sfer o różnych promieniach. Niepewność wynika z dyskretnego modelu sfery składającej się ze skończonej ilości komórek przestrzennych – voxeli.

W praktyce pole powierzchni przestrzeni porowych wyraża się najczęściej jako tzw. powierzchnię właściwą. Powierzchnia właściwa zdefiniowana jest jako pole przestrzeni porowych w badanej próbce podzielone przez objętość badanej próbki. Wymiar powierzchni właściwej to L^{-1} . Obliczone pole powierzchni właściwej przestrzeni porowych dla badanej próbki wynosi $0,187 \pm 0,004 \mu\text{m}^{-1}$. Rysunek 10 przedstawia rozkład rozmiarów przestrzeni porowych w badanej próbce.



Rysunek 10. Rozkład rozmiarów przestrzeni porowych badanych próbek.

8. Podsumowanie

Opracowana została metodyka pomiarów wybranych własności porowatych materiałów geologicznych przy użyciu metody mikrotomografii komputerowej. Wykazano, że układ mikrowiązki promieniowania X w IFJ PAN z linią eksperymentalną przeznaczoną do mikrotomografii komputerowej o wysokiej przestrzennej zdolności rozdzielczej może być z powodzeniem zastosowany do analizy własności materiałów porowatych.

Rozbudowywane jest oprogramowanie służące do analizy danych tomograficznych w celu wyznaczania porowatości, powierzchni właściwej przestrzeni porowej oraz rozkładu rozmiarów przestrzeni porowych. Zaproponowana została metoda segmentacji obrazów tomograficznych oraz została ona zaimplementowana w wyżej wymienionym pakiecie oprogramowania. Planowana jest kontynuacja opisanych badań oraz uzupełnienie ich o numeryczne symulacje dynamiki płynu w przestrzeniach porowych.

9. Bibliografia

- [1] H. Okabe, M. J. Blunt, Phys.Rev.70 (2004) 066135.
- [2] R. D. Hazlett, Transp. Porous Media 20 (1995) 21.
- [3] K.W. Jones et al., Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences, Geological Society, Special Publication, vol.215, London, 2003, 39 pp. Academic Press, San Diego, 1992.
- [4] Sonka, M.,Hlavac ,V., and Boyle, R. Image Processing Analysis and Machine Vision, Thomson-Engineering, second ed. ,1999.
- [5] 9. Julia F. Barrett, MSc and Nicholas Keat, Artifacts in CT: Recognition and Avoidance, RadioGraphics 2004;24:1679-1691
- [6] 9. E. Van de Castele, D. Van Dyck, J. Sijbers, E. Raman, “The effect of beam hardening on resolution in x-ray microtomography”, Medical Imaging 2004: Image Processing. Edited by Fitzpatrick, J. Michael; Sonka, Milan. Proceedings of the SPIE, Volume 5370, pp. 2089-2096 (2004).
- [7] J. Bielecki et al, Conference Proceedings, COST Action IE0601 “Wood Science for Conservation of Cultural Heritage” International Conference on Wooden Cultural Heritage: Evaluation of Deterioration and Management of Change, Hamburg, Germany, October 7-10, 2009, <http://www.woodculther.com>
- [8] Spinsby, J.; Buseck, P. Volume and surface-area measurements using tomography, with an example from the Brenham pallasite meteorite, Computers & Geosciences, vol. 34, issue 1, pp. 1-7