

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Ilościowa ocena porowatości metodą mikrotomografii rentgenowskiej\*

Ważnym aspektem prowadzenia badań metodą mikrotomografii rentgenowskiej jest możliwość dostarczania przez trójwymiarowe dane ilościowych informacji petrofizycznych o przestrzeni porowej. W artykule przedstawiono metodykę ilościowej oceny porowatości i wyniki charakterystyki struktury porowej trzech próbek skał węglanowych, wykonanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Zostało to zrealizowane z wykorzystaniem oprogramowania MAVI, służącego do przetwarzania i analizy obrazów przestrzennych.

### Quantitative porosity estimation with use of X-ray microtomography method

Possibility of delivering petrophysical information on pore space by three-dimensional data constitutes important factor of studies performed with use of X-ray microtomography. The work presents methodology of porosity quantitative estimation and results of pore space characterisation for three carbonate rock samples, carried out with use of X-ray computed microtomography method. This was accomplished with use of MAVI software package, serving processing and analysis of spatial images.

Podstawową wielkością mierzoną w każdym pikselu obrazu mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT) jest współczynnik tłumienia liniowego  $\mu$ . Jest on definiowany przez prawo Beera (rysunek 1):

$$I/I_0 = \exp(-\mu h) \quad (1)$$

gdzie:

$I_0$  – natężenie promieniowania padającego,  
 $I$  – natężenie promieniowania X po przejściu przez ośrodek,  
 $h$  – grubość próbki,  
 $\mu$  – współczynnik tłumienia liniowego.

Prawo Beera zakłada wiązkę dobrze skolimowaną i monochromatyczne źródło promieni X. Lampa rentgenowska stosowana w skanerach micro-CT emituje raczej widmo energii promieniowania X, aniżeli energię monochromatyczną, co powoduje artefakty obrazu, nazywane „utwardzaniem wiązki”. Problem ten został omówiony m.in. w pracach Wellington i in. [7], Van Geet i in. [4, 5], Vervoort i in. [6] oraz Dohnalik M. i in. [1].

Współczynnik tłumienia liniowego  $\mu$ , który zależy zarówno od gęstości elektronowej (gęstości średniej)  $\rho$ , jak i liczby atomowej  $Z$ , ma postać:

$$\mu = \rho \left( a + \frac{b \cdot Z^{3,8}}{E^{3,2}} \right) \quad (2)$$

gdzie:

$a$  – jest niemal niezależnym od energii współczynnikiem, nazywanym współczynnikiem Klein-Nishina,  
 $b$  – stała ( $9,8 \times 10^{-24}$ ).

Pierwszy człon w równaniu (2) reprezentuje rozpraszanie Comptona, które jest przeważające przy energiach promieniowania X powyżej 100 keV, czyli zakresie, w którym normalnie pracują skanery mikrotomograficzne. Drugi człon równania (2) uwzględnia absorpcję fotoelektryczną, która ma większe znaczenie przy energiach promieniowania X znacznie poniżej 100 keV.

Poprzez wykonanie skanowania przy wysokich i przy niskich energiach promieniowania X oraz rozwiązując równanie (2) dla każdego piksela osobno, można uzyskać jeden obraz proporcjonalny tylko do gęstości średniej i drugi obraz proporcjonalny tylko do liczby atomowej (tj. składu chemicznego skały i płynów). Skanowanie micro-CT dla dwóch poziomów energii jest osiągnięte przez zmianę napięcia przyspieszającego przyłożonego

\* Fragment referatu „Mikrotomografia rentgenowska – nowe narzędzie do analizy przestrzeni porowej skał”, wygłoszonego na Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Rozwój techniki i technologii w poszukiwaniach naftowych”, która odbyła się w Pile w dniach 15-17.04.2009 r.

do lampy rentgenowskiej, poprzez umieszczanie filtrów promieni X na drodze wiązki, lub przez połączenie obu tych metod [7, 8].

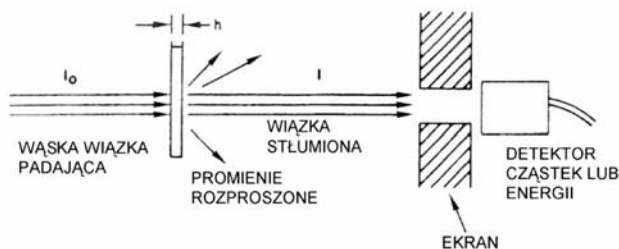
Gdy występuje mieszanina gatunków atomowych to absorpcja fotoelektryczna jest proporcjonalna do efektywnej liczby atomowej  $Z_e$ :

$$Z_e = \left( \sum f_i Z_i^{3,8} \right)^{1/3,8} \quad (3)$$

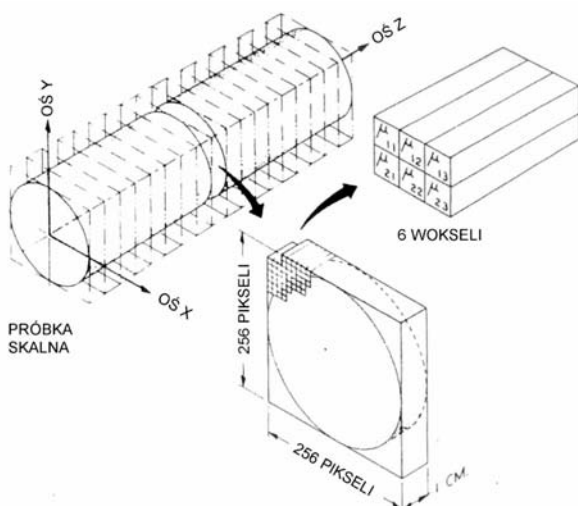
gdzie  $f_i$  jest ułamkiem elektronów w  $i$ -tym rodzaju liczby atomowej.

Na przykład: efektywna liczba atomowa wody wynosi 7,54, ponieważ w atomach wodoru są dwa elektrony ( $Z=1$ ) oraz osiem elektronów w atomie tlenu ( $Z=8$ ):  $[2/10(1^{3,8}) + 8/10(8^{3,8})]^{1/3,8}$ . Ten przykład pokazuje, że efektywna liczba atomowa mierzona przez mikrotomograf rentgenowski cięży znacznie w kierunku komponentów o wyższych liczbach atomowych [7].

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa opiera się na zapisywaniu projekcji promieniowania X badanego obiektu dla kolejnych pozycji kątowych w zakresie od 0-360°. Do rekonstrukcji wirtualnego przekroju przez obiekt wykorzystywany jest algorytm projekcji wstecznej,



Rys. 1. Zastosowanie prawa Beera w konwencjonalnej radiografii rentgenowskiej [7]



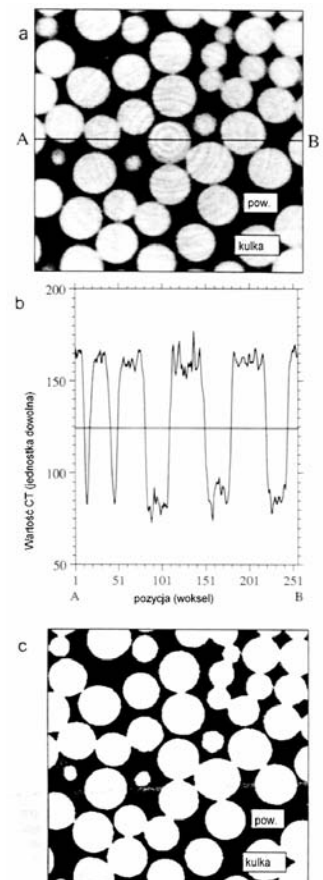
Rys. 2. Wzór obrazu współczynnika tłumienia liniowego [7]

efektem którego jest zobrazowanie zmienności współczynnika pochłaniania liniowego. Obrazy 3D są rekonstruowane z sekwencyjnych warstw przekrojowych, zbieranych w trakcie przesuwania próbki (rysunek 2). Z chwilą gdy ten zestaw danych 3D zostanie już zebrany, możliwe jest oglądanie dowolnej płaszczyzny poprowadzonej przez obiekt.

Najbardziej istotnym problemem w ilościowej ocenie parametrów przestrzeni porowej metodą micro-CT jest ustalenie wartości progowej rozdzielającej przestrzeń porową i szkielet skały [4, 5, 7, 3].

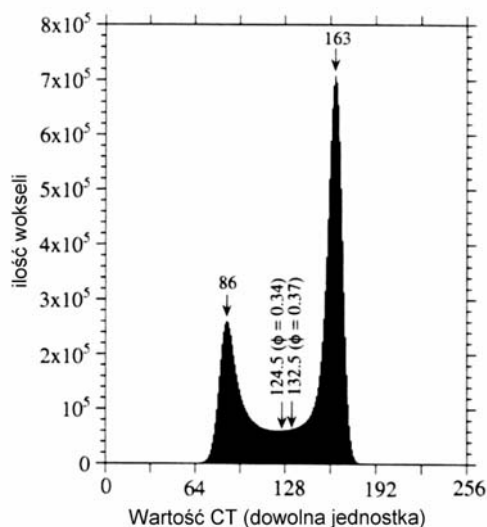
Szczególnie interesująca i bardzo pomocna była praca Nakashimy [2], który obliczał porowatość dla pakietu kulek szklanych. Uzyskane obrazy 2D mikrotomografii pokazano na rysunku 3a. W pierwszym kroku ilościowej analizy obrazu autor [3] określał wartość progową CT, rozdzielającą kulki od otaczającego powietrza. Rozkład wartości CT w zbiorze danych 3D pokazano na rysunku 4. Występują dwa pikiki: dla powietrza otaczającego (86) i dla kulek szklanych (163), które są przedstawione na histogramie. Ponieważ woksele

mają skończone rozmiary, woksel na granicy faz kulka/powietrze zawiera zarówno kulkę o wysokiej gęstości, jak i powietrze o niskiej gęstości. W wyniku tego wartości CT wokseli na granicy faz leżą w zakresie pomiędzy 86 a 163, dając poziom przewodności pomiędzy tymi dwoma pikami. Autor ustalił wartość progową jako punkt środkowy pomiędzy tymi pikami tak, jak pokazano to na rysunku 3b, a przykład obrazu binarnego uzyskanego z zastosowaniem tej wartości progowej przedstawiono na rysunku 3c.



Rys. 3. Dwuwymiarowy obraz rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) złoża kulek

a – obraz nieobrobiony, b – profil wartości CT (wartość progowa do przetworzenia w obraz binarny (124,5) jest wskazana linią poziomą), c – obraz binarny dla wartości progowej 124,5 [2]



**Rys. 4.** Histogram wartości CT 256<sup>3</sup> wokseli. Wskazano wartości pików dla rozkładu kulek szklanych (163) oraz otaczającego powietrza (86). Pokazano również porowatości, zależące od wartości progowych [2]



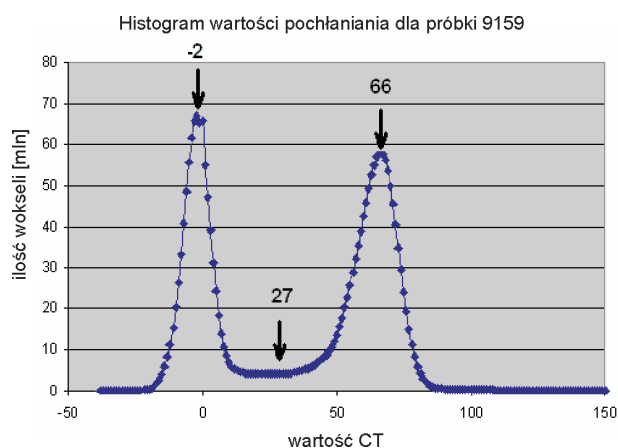
**Rys. 5.** Zdjęcia próbek poddanych badaniu metodą micro-CT

Analiza porowatości metodą mikrotomografii rentgenowskiej została przeprowadzona na trzech próbkach skał węglanowych formacji dolomitu głównego, których fotografie pokazano na rysunku 5. Wszystkie próbki pochodziły z otworu wiertniczego SG-2K, z różnych głębokości (próbka 9171 z gł. 3347,6 m; 9159 z gł. 3321,25 m; 9161 z gł. 3326,45 m) i cechowały się różnymi właściwościami petrofizycznymi.

Ilościowa ocena informacji petrofizycznych o przestrzeni porowej została wykonana z wykorzystaniem oprogramowania MAVI, służącego do przetwarzania i analizy trójwymiarowych obrazów, dając podobne rodzaje informacji przestrzennych jak dotychczas stosowane systemy analizy obrazów dwuwymiarowych.

Rozróżnienie pomiędzy porowatością i szkieletem skały zostało przeprowadzone techniką ustalania progu poprzez segmentację. W badanym przypadku segmentacja polegała na znalezieniu wartości progowej, oddzielającej woksele o niskiej wartości pochłaniania od wokseli o wysokiej war-

tości pochłaniania. Woksele o niskiej wartości pochłaniania zostały przypisane do warstwy porów, a woksele o wysokiej wartości przypisano do warstwy szkieletu skalnego. Dla tak wyselekcjonowanych próbek wykonano histogramy ich wartości szarości, z których wybrano wartość najrzadziej występującą w całym zbiorze. Histogram każdej próbki przedstawia ilościowy udział poszczególnych wartości szarości znajdujących się w analizowanym obrazie. Histogram charakteryzuje się dwoma pikami (rysunek 6): pierwszy związany jest z wartościami absorpcji promieniowania X przez powietrze (-2), a drugi – z wartościami pochłaniania szkieletu skalnego (66). Ponieważ woksele mają skończone rozmiary, woksel na granicy faz matryca/powietrze zawiera zarówno matrycę o wysokiej gęstości, jak i powietrze o niskiej gęstości. Leżą one w zakresie pomiędzy -2 a 66, dając poziom przewodności pomiędzy tymi dwoma pikami. Wartość progową wyznaczono w sposób przedstawiony na rysunku 6.



**Rys. 6.** Przykładowy histogram wartości absorpcji promieniowania. Wskazano wartości pików dla rozkładu matrycy skalnej (66), powietrza otaczającego (-2) oraz wartość występującą najrzadziej (27)

Porowatość została obliczona jako stosunek objętości warstwy porów występujących w próbce, do całkowitej objętości próbki:



$$Kp = \frac{V_{por}}{V_{por} + V_{szkielet}} \quad (4)$$

gdzie:

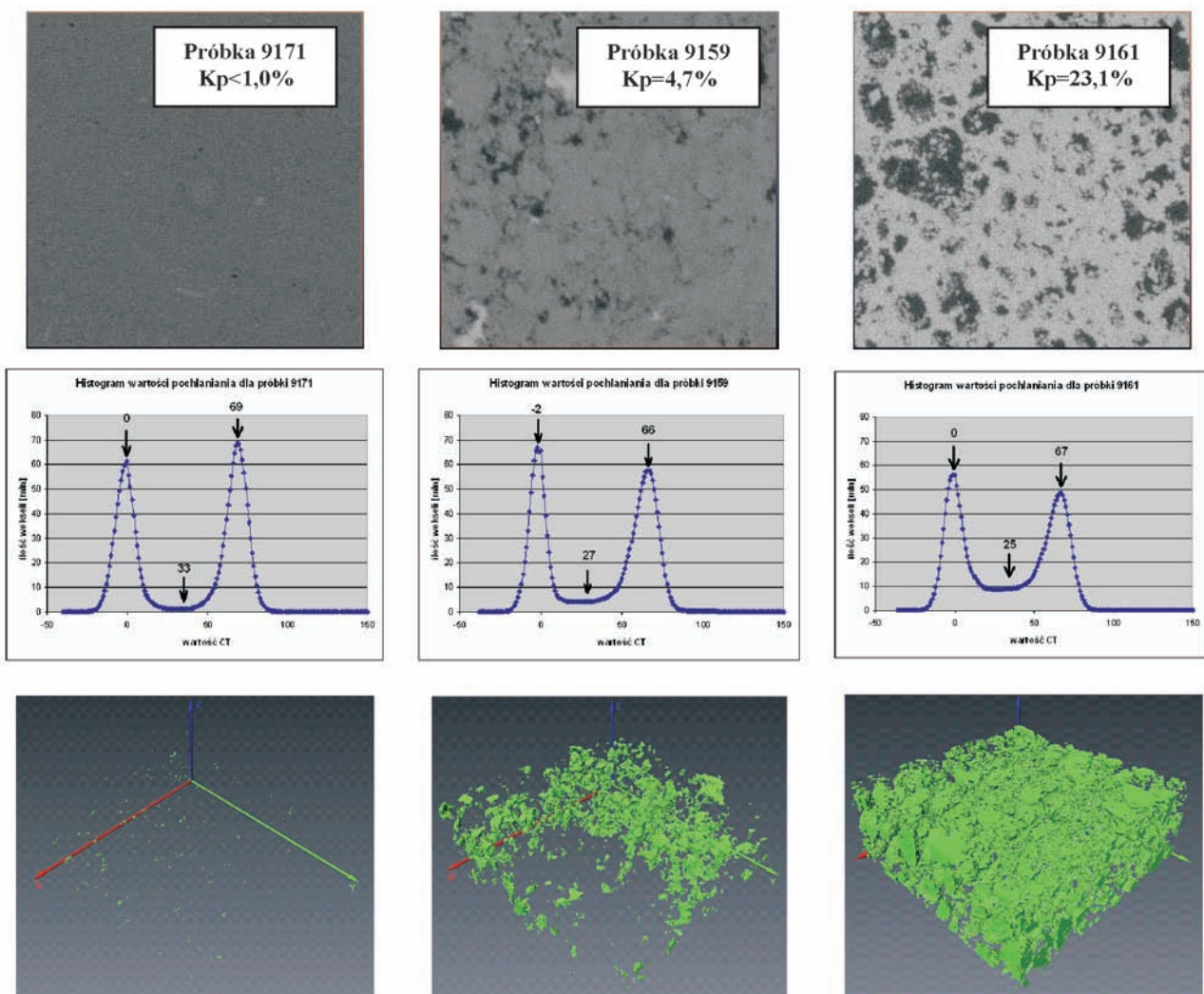
$V_{por}$  – objętość warstwy porów [woksel],

$V_{szkielet}$  – objętość warstwy szkieletu [woksel].

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki oceny porowatości metodą micro-CT dla trzech próbek dolomitu, charakteryzujących się różną porowatością (odpowiednio <1,0%, 4,7% i 23,1%). Górny wiersz przedstawia dwuwymiarowy przekrój przez próbki, uwidaczniający różnice we współczynniku tłumienia liniowego, obserwowany poprzez zmienność poziomów szarości, gdzie kolor czarny reprezentuje pustkę powietrzną (porowatość), a kolor

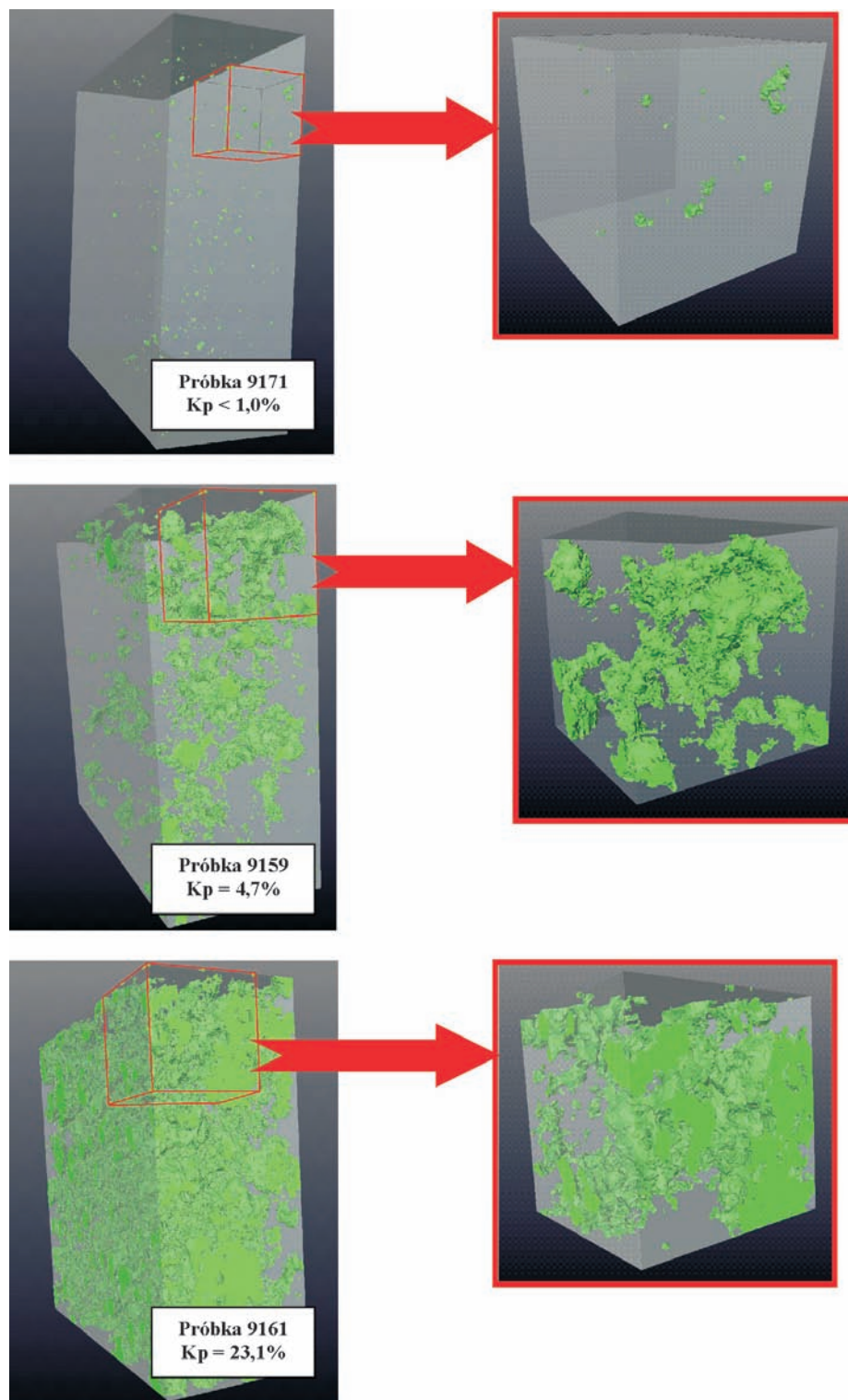
szary – szkielet mineralny. Środkowy wiersz to histogramy pokazujące bimodalny rozkład poziomów szarości w próbce (wartości CT). Dolny wiersz ilustruje trójwymiarową konstrukcję i wizualizację danych micro-CT, obrazującą porowatość (kolor zielony).

Na podstawie analizy samych tylko histogramów można względnie porównać porowatości badanych próbek. Pole powierzchni pod drugim pikiem, związanym z występowaniem wokseli należących do szkieletu skalnego, wyraźnie maleje wraz ze wzrostem porowatości. Spowodowane jest to tym, iż w analizowanej objętości wraz ze wzrostem współczynnika porowatości występuje mniej wokseli odwzorowujących szkielet skalny, na rzecz wokseli odpowiadających strukturze porowej. Podsumowując; im mniejsza powierzchnia piku odpowiadającego szkieletowi



Rys. 7. Wyniki oceny porowatości metodą micro-CT dla trzech próbek dolomitu

Górny wiersz – dwuwymiarowy przekrój przez próbkę, uwidaczniający różnice we współczynniku tłumienia liniowego, obserwowany poprzez zmienność poziomów szarości, gdzie kolor czarny reprezentuje pustkę powietrzną (porowatość), a kolor szary – szkielet mineralny. Środkowy wiersz – histogram pokazujący bimodalny rozkład poziomów szarości w próbce (wartości CT). Wskazano wartości pików dla rozkładu macierzy skalnej (69, 66, 67) oraz powietrza otaczającego (0-2,0). Dolny wiersz – 3D zrekonstruowane i zwizualizowane dane micro-CT, uwidaczniające porowatość (kolor zielony)



**Rys. 8.** Trójwymiarowa rekonstrukcja 3D danych micro-CT uwydatniająca porowatość (kolor zielony – przestrzeń porowa, kolor szary – szkielet mineralny)

skalnemu, tym wyższy współczynnik porowatości analizowanej próbki.

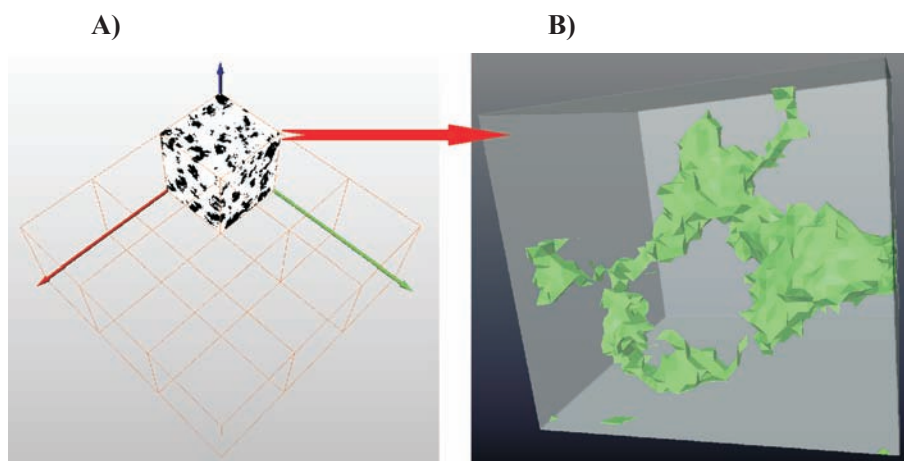
Na rysunku 8 przedstawiono rekonstrukcję 3D danych micro-CT uwydatniająca porowatość (kolor zielony) w trzech analizowanych próbkach. Obraz po lewej stronie daje poglądową informację, natomiast obraz po prawej

stronie dostarcza więcej szczegółów dotyczących połączonej przestrzeni porowej.

Wizualizacja micro-CT porowatości próbki 9171 wykazuje minimalną ilość porów, próbka 9159 obrazuje w miarę jednorodnie rozłożone pory, podczas gdy próbka 9161 ilustruje bardzo niejednorodny rozkład przestrzeni porowej.

Chcąc uzyskać jeszcze bardziej szczegółowe informacje dotyczące struktury porów, z badanej przestrzeni można wydzielić dowolną liczbę podpróbek (jak przedstawiono to na rysunku 9A) i gruntownie przeanalizować osobno każdy fragment badanej próbki (rysunek 9B).

Mikrotomografia rentgenowska to szybka, nieinwazyjna, ilościowa technika obrazowania, o znakomitej rozdzielczości 3D, będąca użytecznym narzędziem do analizy właściwości zbiornikowych skał.



Rys. 9. A – Schematyczny podział próbki 9159 na podpróbki, B – wydzielona przestrzeń porowa podpróbki 9159A

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

## Literatura

- [1] Dohnalik M., Zalewska J.: *Zastosowanie mikrotomografii rentgenowskiej do rozwiązywania zagadnień geologicznych i geofizycznych*. Prace INiG Nr 157, monografia 2009.
- [2] Nakashima Y., Watanabe Y.: *Estimate of transport properties of porous media by microfocus X-ray computed tomography and random walk simulation*. Water Resources Research, No. 12, vol. 38, 2002.
- [3] Rivers M.: *Tutorial Introduction to X-ray Computed Microtomography Data Processing*. University of Chicago, 1999.
- [4] Van Geet M., Lagrou D., Swennen R.: *Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography ( $\mu$ CT)*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 215: 51-60, 2003.
- [5] Van Geet, M., Swennen, R., Wevers, M.: *Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography*. Sedimentary Geology, 132, 25-36, 2000.
- [6] Vervoort A., Wevers M., Swennen R., Roels S., Van Geet M., Sellers E.: *Recent advances of X-ray CT and its applications for rock material*. Otani J., Obara Y., 2004, *X-ray CT for geomaterials, soils, concrete, rocks*.
- [7] Wellington S.L., Vinegar H.J.: *X-ray computerized tomography*. Journal of Petroleum Technology, p. 885-898, 1987.
- [8] 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.



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.