

Pomiary dwuenergetycznej tomografii (Dual Energy CT) w celu badania skał

Calibration of dual energy CT scans for rock core examination

Marek Dohnalik

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Jan Kaczmarczyk

STRESZCZENIE: Jedno z pierwszych zastosowań rentgenowskiej tomografii komputerowej w geologii miało miejsce w 1974 roku. Tomografia rentgenowska (CT) umożliwia nieinwazyjne obrazowanie badanych przedmiotów. Wynikiem pomiaru tomograficznego jest przestrzenny obraz, przedstawiający zmiany absorpcji promieniowania rentgenowskiego. Powstaje on poprzez wyliczenie, podczas procesu rekonstrukcji, wartości absorpcji dla każdego punktu badanego przedmiotu. Istotną zaletą tomografów komputerowych jest możliwość przebadania dużych obiektów (metrowych odcinków rdzenia) w bardzo krótkim czasie. Ich wadą jest natomiast względnie niska rozdzielczość pomiaru. Każdy woksel na obrazie tomograficznym ma przypisaną konkretną wartość zaczerpniętą proporcjonalnie do liniowego współczynnika tłumienia, zależną od gęstości elektronowej i efektywnej liczby atomowej, uśrednionych w obrazowanej przestrzeni (zakres uśredniania określa rozdzielczość obrazu tomograficznego). Dysponując dwoma obrazami, zarejestrowanymi przy dwóch różnych energiach pomiaru, można podjąć próbę rozdzielenia obrazu na dwie składowe: pierwszą – zależną od gęstości elektronowej i drugą – zależną od efektywnej liczby atomowej. Celem opisanych prac jest pokazanie możliwości wykorzystania dwuenergetycznej tomografii komputerowej (DECT) do charakterystyki litologiczno-gęstościowej rdzeni wiertniczych. Aby wykorzystać obrazy tomograficzne do otrzymania wymienionych wielkości fizykochemicznych konieczna jest standaryzacja obrazów. W pracy przedstawiono proces wyznaczania współczynników kalibracyjnych, które są niezbędne do przeliczania wartości współczynników absorpcji, będących bezpośrednim wynikiem rekonstrukcji pomiaru tomograficznego na wartości gęstości elektronowej oraz efektywnej liczby atomowej Z . W artykule zaprezentowano proces kalibracji z wykorzystaniem wzorcowych minerałów. Wyliczone z analizy obrazów wartości próbek wzorcowych, porównano z wartościami wyznaczonymi metodami laboratoryjnymi. Przykład zastosowania wyników przedstawiono na przebadanym fragmencie obrazu rdzenia piaskowca, zawierającego szczelinę wypełnioną kalcytem.

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa, Dual Energy CT, DECT, dwuenergetyczna tomografia.

ABSTRACT: One of the first applications of X-ray computed tomography in geology took place in 1974. X-ray tomography (CT) allows non-invasive imaging of the examined objects. The result of a tomographic measurement is a spatial image, showing the changes in X-ray absorption value for each point of the examined object, which are a result of calculations during the reconstruction process. An important advantage of computer tomographs is the ability to test large objects (meter sections of the core) in a very short time, while the disadvantage is the relatively low resolution of the measurement. Each voxel in the tomographic image has a specific grey value, proportional to the linear attenuation coefficient, depending on the electron density and the effective atomic number averaged in the imaged space (the averaging range is determined by the resolution of the tomographic image). Two tomographic images registered at two different energies, allows the deconvolution of the images into two components: the first – dependent on the electron density and the second – dependent on the effective atomic number. The aim of this study is to show the possibility of using dual energy computed tomography (DECT) to litho-density characterization of rock cores. In order to use tomographic images to obtain the above-mentioned physicochemical values, it is necessary to standardize CT images. The paper presents the process of determining calibration coefficients, which are necessary to convert the values of absorption coefficients, which are a direct result of CT reconstruction, into density values and effective Z atomic number. The article presents the calibration process with the use of reference rock fragments. The values of the standard samples computed from the analysis of images were compared with the values determined by laboratory methods. An example of the application of results is presented on the examined part of the image of the sandstone core, containing a calcite-filled fracture.

Key words: computed tomography, dual energy CT, DECT, dual energy computed tomography.

Autor do korespondencji: M. Dohnalik, e-mail: marek.dohnalik@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji 31.12.2018 r. Zatwierdzono do druku 22.02.2019 r.

Wstęp

Celem pracy jest analiza wykorzystania potencjału pomiarów tomograficznych w trybie dwuenergetycznym (Dual Energy CT, DECT) do określania charakterystyki gęstościowo-litologicznej rdzeni wiertniczych.

Dotychczasowe badania tomograficzne (CT) rdzeni wiertniczych ograniczały się do obrazowania struktury rdzenia (Baker et al., 2012; Cnudde i Boone, 2013; Kaczmarek et al., 2017; Urbaniec et al., 2018); ewentualnie w przypadku skał węglanowych, zawierających znacznych rozmiarów kawerny, stosowane one były do analizy porowatości (Zalewska et al., 2010; Guo J. et al., 2012; Galkin et al., 2015; Krakowska et al., 2016; Wang et al., 2016). Niezależnie od litologii, możliwe było także wygenerowanie profili reprezentujących zmienność porowatości i gęstości objętościowej wzdłuż rdzenia (Wolański et al., 2016; Skupio i Dohnalik, 2017; Drabik et al., 2018).

Niestety, wymienione jako ostatnie zastosowanie CT do oceny porowatości i gęstości jest z założenia obarczone błędem. W tym przypadku zakłada się, że wartości zaczerpnięte z obrazu, wyrażone w jednostkach Hounsfielda (HU), zależą tylko od gęstości objętościowej badanego fragmentu rdzenia. Jak wynika z poniższego wzoru (1), liniowy współczynnik tłumienia μ , na podstawie którego wyznacza się skalibrowane wartości HU (Victor et al., 2017), zależy od gęstości elektronowej (ρ) i efektywnej liczby atomowej (Z_{eff}) uśrednionych w obrazowanej przestrzeni (zakres uśredniania określa rozdzielczość obrazu tomograficznego):

$$\mu = \rho \left(a + \frac{bZ_{eff}^n}{E^{3,2}} \right) \quad (1)$$

gdzie:

E – energia promieniowania rentgenowskiego,

a – współczynnik Kleina–Nishina,

b – stała,

n – wykładnik Z_{eff} .

W praktyce, bardziej przydatna jest informacja o gęstości objętościowej (ρ_b), a nie elektronowej. Do przeliczenia wartości gęstości elektronowej, na wartości gęstości objętościowej, wykorzystano poniższe równanie (Gardner i Dumanoir, 1980):

$$\rho_b = \frac{\rho - 0,1759}{0,9342} \quad (2)$$

Pojedynczy obraz tomograficzny niesie więc w sobie sprężoną informację o gęstości elektronowej i efektywnej liczbie atomowej próbki przedstawioną w postaci liniowych współczynników tłumienia. Dysponując dwoma obrazami, można podjąć próbę rozdzielenia obrazu na dwie składowe: pierwszą – zależną od gęstości elektronowej i drugą – zależną od efektywnej liczby atomowej dzięki układowi równań:

$$\begin{cases} \mu_1 = \rho \left(a + \frac{bZ_{eff}^n}{E_1^{3,2}} \right) \\ \mu_2 = \rho \left(a + \frac{bZ_{eff}^n}{E_2^{3,2}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

gdzie indeksy 1 i 2 odnoszą się do obrazu 1 i 2.

Aby taki układ równań posiadał sens fizyczny należy mieć pewność, że pierwsze i drugie równanie nie są ze sobą tożsame. Oznacza to, że na jednym z wykorzystanych obrazów powinny dominować efekty związane z gęstością elektronową, a na drugim – z efektywną liczbą atomową. W praktyce można to zrealizować przez wykonanie pierwszego i drugiego pomiaru tomograficznego przy dwóch różnych energiach wiązki promieniowania X. Parametrem pomiarowym, który zapewnia takie warunki, jest napięcie przyspieszające na lampie rentgenowskiej, od którego zależy energia wiązki. Granicznym napięciem przyspieszającym oddzielającym obrazy o dominującym udziale ρ_b i Z_{eff} jest 100 kV (Siddiqui i Khamees, 2004).

Wykorzystując podane dane, można ułożyć układ równań (równanie 4) pozwalający na bezpośrednie obliczenie gęstości objętościowej, o ile dla danego woksela znana jest wartość HU przy energii wiązki rentgenowskiej znacznie powyżej 100 kV (CT_{high}) i znacznie poniżej 100 kV (CT_{low}).

$$\begin{cases} \rho_b = m \cdot CT_{low} + p \cdot CT_{high} + q \\ Z_{eff} = \left(\frac{r \cdot CT_{low} + s \cdot CT_{high} + t}{0,9342 \cdot \rho_b + 0,1759} \right)^{\frac{1}{n}} \end{cases} \quad (4)$$

Parametry m, p, q, r, s i t są stałymi wyznaczonymi dla danego układu pomiarowego, a wyznacza się je na podstawie pomiarów dla trzech wzorców o znanym ρ_b i Z_{eff} .

Metodyka badawcza

W celu otrzymania niezbędnych współczynników, wykonano serię pomiarów DECT dla wcześniej przygotowanych próbek wzorcowych, mającą na celu kalibrację danych. Gęstość objętościowa i efektywna liczba atomowa wzorców użytych do kalibracji zostały wyznaczone laboratoryjnie. Gęstość wyliczono z pomiaru masy próbki oraz pomiaru objętości otrzymanego poprzez ważenie próbki w rtęci. Wartości Z_{eff} próbek wzorcowych zostały pomierzone przy użyciu spektrometru fluorescencji rentgenowskiej (XRF-EDS) Bruker S1Titan.

Pomiary

Badania przeprowadzono przy użyciu medycznego tomografu rentgenowskiego. Zestaw próbek wzorcowych, składający się z czystych minerałów:

- kwarc,
- kalcyt,
- piryt,
- korund,
- ortoklaz,
- chloryt,

został zobrazowany dwukrotnie.

W czasie pierwszego pomiaru napięcie przyspieszające na lampie rentgenowskiej wynosiło 80 kV, a w czasie drugiego – 140 kV. Na podstawie zarejestrowanych obrazów, przy użyciu funkcji *Histogram* w programie FIJI (licencja: ImageJ 1.51u), obliczono średnią wartość zaczernienia dla poszczególnych minerałów wzorcowych przy niskiej (CT_{low}) i wysokiej (CT_{high}) energii wiązki rentgenowskiej. Wartości zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. wartości tabelaryczne i eksperymentalne parametrów zobrazowanych wzorców

Table 1. Tabulated and experimental data of scanned standards

Mineral	Gęstość (ρ_b)	Z_{eff}	Średnia CT_{low}	Średnia CT_{high}
	[g · cm ⁻³]		[HU]	
Kwarc	2,62	11,53	2328	1838
Kalcyt	2,68	15,71	3746	2586
Piryt	4,76	21,95	9160	6749
Korund	3,78	11,18	3289	2708
Ortoklaz	2,33	12,60	2233	1585
Chloryt	2,59	11,67	1956	1599

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 1 (wartości pomierzone i średnie wartości zaczernienia) ułożono macierzowe układy równań pozwalające wyznaczyć parametry kalibracyjne m , p , q , r , s i t potrzebne do rozwiązania układu równań (4):

$$\begin{bmatrix} CT_{low,1} & CT_{high,1} & 1 \\ CT_{low,2} & CT_{high,2} & 1 \\ CT_{low,3} & CT_{high,3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_{b,1} \\ \rho_{b,2} \\ \rho_{b,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} CT_{low,1} & CT_{high,1} & 1 \\ CT_{low,2} & CT_{high,2} & 1 \\ CT_{low,3} & CT_{high,3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{eff,1}^{3,6} \cdot 0,9342\rho_{b,1} + 0,1759 \\ Z_{eff,2}^{3,6} \cdot 0,9342\rho_{b,2} + 0,1759 \\ Z_{eff,3}^{3,6} \cdot 0,9342\rho_{b,3} + 0,1759 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ s \\ t \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie indeksy 1, 2 i 3 odnoszą się do trzech minerałów wykorzystanych do kalibracji. Trzecią kolumnę macierzy parametrów uzupełniono liczbą 1, aby uzyskać niezerowy wyznacznik macierzy. Przyjęto współczynnik $n = 3,6$ (Siddiqui i Khamees, 2004). Do rozwiązania równań (5) i (6) wystarczyłby zestaw danych laboratoryjnych i pomiarowych dla trzech minerałów.

Ponieważ dysponowano pełnymi danymi dla sześciu wzorców to w celu zwiększenia dokładności kalibracji zastosowano metodę kombinatoryczną polegającą na tym, że:

- wzorce podzielono na dwadzieścia różnych grup po trzy próbki wzorcowe;
- dla każdej z grup rozwiązano równania (5) i (6), uzyskując wartości parametrów m , p , q , r , s i t ;
- każdy minerał wzorcowy podczas wyznaczania parametrów kalibracyjnych został wykorzystany dokładnie sześć razy;
- ostateczne wartości każdego z parametrów kalibracyjnych uzyskano przez obliczenie wartości średniej z 20 wyznaczonych wartości.

Uzyskane wartości parametrów kalibracyjnych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyznaczone wartości parametrów kalibracyjnych DECT

Table 2. Determined DECT images calibration factors

Parametr	Wartość
m	-1,339
p	2,646
q	950,6
r	58006,4
s	-53004,8
t	-14803251,5

Aby sprawdzić poprawność wykonanej kalibracji, do równania (4) jako wartości CT_{low} i CT_{high} podstawiono średnie zaczernienie obrazu każdego z minerałów przedstawione w tabeli 1. Obliczone wartości gęstości objętościowej (gęstość CT, ρ_{CT}) i efektywnej liczby atomowej ($Z_{eff} CT$) przedstawiono w tabeli 3.

Dla kwarcu, kalcytu, ortoklazu i chlorytu, błąd pomiaru gęstości objętościowej, z analizy obrazu, nie przekracza 5%. Jedyne dla pirytu i korundu wartości błędów są wyższe i wynoszą odpowiednio 11% i 8%. Większy błąd zarejestrowano dla pomiarów efektywnej liczby atomowej. Zadowolającą wartość, poniżej 5%, otrzymano dla kwarcu, kalcytu i ortoklazu. W przypadku pirytu błąd wynosi 15%, a dla korundu 24%. Piryt jest minerałem, którego obecność w analizowanych rdzeniach jest wysoce prawdopodobna. Pomimo znacznej wartości błędów względnego analizy obrazu dla pirytu, jego identyfikacja nie powinna dostarczać większych trudności, gdyż charakteryzuje się największymi wartościami obydwu analizowanych parametrów.

Przeprowadzono także analizę czułości kalibracji polegającą na usuwaniu kilku minerałów z zestawu wzorców kalibracyjnych i powtórzeniu obliczeń. Testy te wykazały, że usunięcie dowolnego ze wzorców z kombinacji pogarsza jakość wyznaczonych wyników, dlatego w dalszych obliczeniach postanowiono wykorzystać pełny zestaw wzorców kalibracyjnych i parametry podane w tabeli 2.

Tabela 3. Wartości gęstości objętościowej i efektywnej liczby atomowej dla minerałów wzorcowych wyznaczone na podstawie średniego zaczernienia obrazu (podanego w tabeli 1)

Table 3. Bulk density and effective atomic number (Z_{eff}) values calculated from DECT images porcessing

Minerał	Gęstość (ρ_b)	Z_{eff}	Gęstość CT	$Z_{eff} CT$	Błąd względny gęstości	Błąd względny Z_{eff}
	[g · cm ⁻³]		[g · cm ⁻³]		[%]	
Kwarc	2,62	11,53	2,69	12,01	3	4
Kalcyt	2,68	15,71	2,59	16,17	3	3
Piryt	4,76	21,95	5,30	18,60	11	15
Korund	3,78	11,18	3,48	13,86	8	24
Ortoklaz	2,33	12,60	2,22	12,34	5	2
Chloryt	2,59	11,67	2,61	10,15	1	13

Analiza obrazu tomograficznego metodą DECT

W celu sprawdzenia współczynników kalibracyjnych, przetworzono (przy użyciu programu FIJI) oryginalne obrazy zestawu próbek kalibracyjnych w sposób, w jaki metoda ma być docelowo wykorzystana w analizie rdzeni wiertniczych. Do programu FIJI wczytano dwa obrazy zestawu próbek kalibracyjnych.

W pierwszym kroku, usunięto tło obrazów przez ustawienie wartości nienumerycznej (NaN – *not a number*) na wszystkich wokselach o wartościach CT mniejszych lub równych 0. W przypadku obrazu rdzenia wiertniczego, etap ten wykonywany jest przez przycięcie obrazu tak, aby analizowany obszar nie obejmował powietrza dookoła rdzenia. Należy pamiętać o tym, aby po przycięciu, obrazy zarejestrowane przy różnych energiach przedstawiały dokładnie taki sam fragment przestrzeni.

Następnie wykorzystano funkcję *Process/Image Expression Parse* w celu przeliczenia współczynników μ dla każdego wokselu na wartości ρ_{CT} i $Z_{eff} CT$. Definiując obraz zarejestrowany przy wysokiej energii wiązki (140 kV) jako A, a przy energii niskiej (80 kV) jako B, wprowadzono do FIJI następujące wyrażenie na gęstość objętościową (g/m³):

$$-1,3391 \cdot B + 2,646 \cdot A + 950,6 \quad (7)$$

oraz na efektywną liczbę atomową:

$$\sqrt[3.6]{\frac{58006,4 \cdot B - 53004,8 \cdot A - 14803251,5}{0,9342 \cdot (-1,3391 \cdot B + 2,646 \cdot A + 950,6) + 0,1759}} \quad (8)$$

Wyniki badań

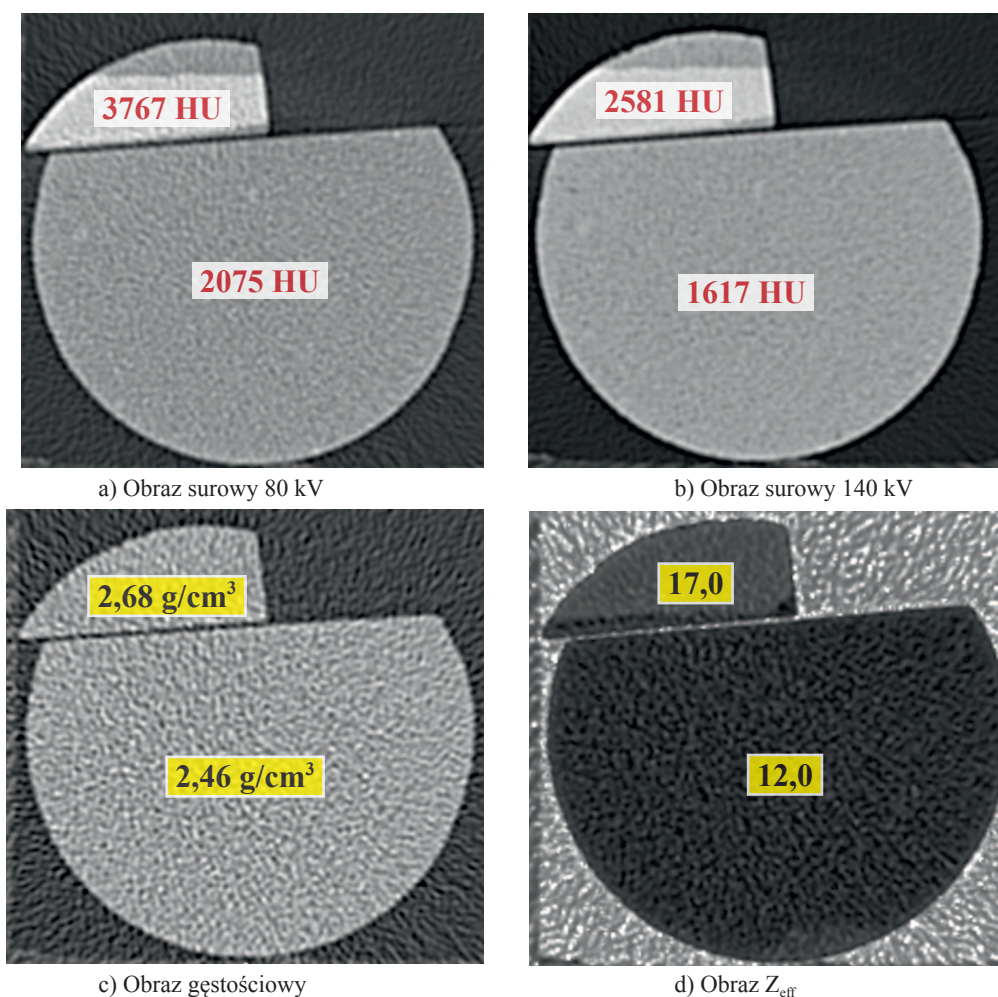
W celu sprawdzenia poprawności przyjętych założeń przeprowadzono badanie testowe na fragmencie rdzenia piaskowca, zawierającego szczelinę wypełnioną kalcytem. Dane

odniesienia zostały otrzymane z pomiarów ręcznym spektrometrem fluorescencji rentgenowskiej (XRF). Wartości gęstości objętościowej przyjęto natomiast z pomiarów próbek wzorcowych. Na poniższym rysunku (rysunek 1) przedstawiono cztery obrazy reprezentujące przekrój tego samego fragmentu rdzenia. Obraz 1a) przedstawia przekrój otrzymany na podstawie pomiaru CT z zastosowaniem 80 kV napięcia przyspieszającego, 1b) obraz otrzymany po rekonstrukcji pomiaru CT z zastosowaniem 140 kV napięcia przyspieszającego, 1c) wyliczony obraz gęstościowy i 1d) wyliczony obraz Z_{eff} .

W górnej, odciętej części rdzenia można zauważyć jaśniejszy fragment (rysunki 1a, 1b). Jest to szczelina wypełniona kalcytem. Zarówno na obrazie 80 kV, jak i 140 kV jest ona wyraźnie widoczna, ze względu na podwyższoną absorpcję w porównaniu do piaskowcowej matrycy.

Praktycznie monotony obraz gęstościowy wyraźnie pokazuje, że w tym przypadku główna różnica absorpcji wynika z różnicy w efektywnej liczbie atomowej pomiędzy kalcytem i kwarcem, co znajduje potwierdzenie w danych uzyskanych metodą XRF (tabela 4). Na obrazie Z_{eff} różnica pomiędzy analizowanymi obszarami jest wyraźnie widoczna. W tabeli 4 przedstawiono błąd względny dla obydwu minerałów, którego wartość nie przekracza 6%, co można uznać za zadowalający wynik. Większy błąd sumaryczny pomiaru otrzymano dla efektywnej liczby atomowej Z_{eff} , dla kwarcu 4%, a dla kalcytu 12% w odniesieniu do próbki wzorcowej.

Powyższe wyniki można uznać za zadowalające. Nawet w przypadku większego błędu (12%) otrzymanego dla kalcytu, można tę wartość zaakceptować. Istotną zaletą pomiarów DECT jest fakt otrzymania dwóch obrazów: gęstościowego i Z_{eff} . Nawet jeżeli, jak to ma miejsce dla przebadanej szczeliny z kalcytem, wartość efektywnej liczby atomowej nie daje precyzyjnej odpowiedzi, koniunkcja informacji o niskiej gęstości minerału i podwyższonej wartości Z_{eff} pozwala wnioskować, że będzie to kalcyt.



Rys. 1. Obraz przekroju przez rdzeń piaskowca z podanymi wartościami HU oraz gęstości objętościowej i Z_{eff} . Obraz 1a) przedstawia przekrój otrzymany na podstawie pomiaru CT z zastosowaniem 80 kV napięcia przyspieszającego. 1b) to obraz otrzymany po rekonstrukcji pomiaru CT z zastosowaniem 140 kV napięcia przyspieszającego. 1c) to wyliczony obraz gęstościowy, a 1d) wyliczony obraz Z_{eff}

Fig. 1. Illustration of sandstone cross section, presenting HU values, bulk density and Z_{eff} . Image 1a) presents low voltage CT scan (80 kV) cross section, 1b) high voltage CT scan (140 kV) cross section, 1c) calculated bulk density values, 1d) Z_{eff} values

Tabela 4. Wyniki wartości gęstości objętościowej i Z_{eff} dla kwarcu i kalcytu, otrzymane metodami laboratoryjnymi i z analizy obrazu

Table 4. Results of bulk density and Z_{eff} for quartz and calcite determined by laboratory measurement and image analysis

Mineral	Gęstość (ρ_b)	Z_{eff}	Gęstość CT	$Z_{eff CT}$	Błąd względny gęstość	Błąd względny Z_{eff}
	[g · cm ⁻³]		[g · cm ⁻³]		[%]	
Kwarc	2,62	11,53	2,46	12,0	6	4
Kalcyt	2,68	15,71	2,68	17,0	0	12

Podsumowanie i wnioski

1. Wykonane pomiary pozwoliły na wyznaczenie parametrów kalibracyjnych, umożliwiających określenie zmian gęstości objętościowej i efektywnej liczby atomowej, na podstawie obrazów tomograficznych fragmentów rdzenia, wykonanych przy napięciu przyspieszającym na lampie rentgenowskiej wynoszącej 80 kV i 140 kV.

2. Wartości gęstości, przedstawione na rysunku 1c) odniesione są do właściwości próbek wzorcowych, a nie do rzeczywistych parametrów badanego fragmentu rdzenia. Dlatego w celu dokładnej weryfikacji jakości metody, istotne jest wykonanie badań na pełnym fragmencie rdzenia a następnie pobranie próbek do określenia rzeczywistych wartości analizowanej próbki. Przy krytycznym rozważaniu otrzymanych wyników, należy mieć na

uwadze fakt, że pomiar DECT trwa około 60 sekund dla każdej energii.

3. Kluczowym elementem przy obliczaniu wartości jest bardzo dokładne dopasowanie obrazów DECT tak, aby analizowany obszar rdzenia posiadał te same współrzędne na obrazie 80 kV oraz 140 kV. Podczas porównywania obrazów, zauważono, że dla niektórych pomiarów występowały znaczne przesunięcia pomiędzy obrazami, dochodzące do 10 wokseli. W przypadku analizowania obszaru o dużej objętości, będącego przedmiotem tej pracy, może to nie mieć istotnego znaczenia. Jednakże w przypadku analizowania szczelin o niewielkiej rozwarości, będzie to kluczowy czynnik decydujący o poprawności otrzymanych wyników badań.
4. Metoda DECT zdecydowanie posiada wysoki potencjał do wyznaczania charakterystyki gęstościowo-litologicznej rdzeni wiertniczych. Przedstawione dane pokazują, że metoda powinna działać w zakresie rdzeni skał najczęściej badanych dla przemysłu poszukiwawczego.
5. Ze względu na niską rozdzielczość obrazów otrzymanych z pomiarów tomografem medycznym, kluczowe do poprawy jakości danych, może być wykonanie pomiarów z wyższą rozdzielczością, urządzenie takie będzie dostępne w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG – PIB od początku 2019 roku.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Ocena możliwości wykorzystania pomiaru dual energy CT (DECT) w badaniu skał* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 38/SW, nr archiwalny SW-4101-38/18.

Literatura

- Baker D.R., Mancini L., Polacci M., Higgins M.D., Gualda G.A.R., Hill R.J., Rivers M.L., 2012. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. *Lithos*, 148: 262–276. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.06.008.
- Cnudde V., Boone M.N., 2013. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123:1–17. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.003.
- Drabik K., Urbaniec A., Mikołajewski Z., Dohnalik M., 2018. Przykłady zastosowania metody rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) rdzeni wiertniczych w analizie skał węglanowych. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, 5: 4–10.
- Galkin S.V., Efimov A.A., Krivoshechekov S.N., Savitskiy Y.V., Cherepanov S.S., 2015. X-ray tomography in petrophysical studies of core samples from oil and gas fields. *Russian Geology and Geophysics*, 56: 782–792. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.04.009.
- Gardner J.S., Dumanoir J.L., 1980. Litho – Density Log Interpretation. *Annual Logging Symposium Transactions*, Paper N: 1–23.
- Guo J.-Ch., Nie R.-S., Jia Y.-L., 2012. Dual permeability flow behavior for modeling horizontal well production in fractured-vuggy carbonate reservoirs. *Journal of Hydrology*, 464: 281–293. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.021.
- Kaczmarek L., Kozłowska A., Maksimeczuk M., Wejrzanowski T., 2017. The use of X-ray computed microtomography for graptolite detection in rock based on core internal structure visualization. *Acta Geologica Polonica*, 67: 299–306. DOI: 10.1515/aggp-2017-0010.
- Krakowska P.I., Dohnalik M., Jarzyna J.A., Wawrzyniak-Guz K., 2016. Computed X-ray microtomography as the useful tool in petrophysics: a case study of tight carbonates Modryn formation from Poland. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 31: 67–75. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.03.011.
- Siddiqui S., Khamees A.A., 2004. Dual-energy CT-Scanning application in rock characterization. SPE-90520-MS. DOI: 10.2118/90520-MS.
- Skupio R., Dohnalik M., 2017. Pomiar gamma-gamma oraz komputerowa tomografia rentgenowska na rdzeniach wiertniczych skał osadowych. *Nafta-Gaz*, 8: 571–582. DOI: 10.18668/NG.2017.08.04.
- Urbaniec A., Drabik K., Dohnalik M., 2018. Selected features of carbonate rocks based on the X-ray computed tomography method (CT). *Nafta-Gaz*, 3: 183–192. DOI: 10.18668/NG.2018.03.01.
- Victor R.A., Prodanović M., Torres-Verdín C., 2017. Monte Carlo approach for estimating density and atomic number from dual-energy computed tomography images of carbonate rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 9804–9824. DOI:10.1002/2017JB014408.
- Wang F., Li Y., Tang X., Chen J., Gao W., 2016. Petrophysical properties analysis of a carbonate reservoir with natural fractures and vugs using X-ray computed tomography. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28: 215–225. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.11.046.
- Wolański K., Zarudzki W., Kiersnowski H., Dohnalik M., Drabik K., 2016. Wykorzystanie tomografii komputerowej w badaniu rdzeni skał. *Nafta-Gaz*, 12: 1035–1042. DOI: 10.18668/NG.2016.12.04.
- Zalewska J., Kaczmarczyk J., Dohnalik M., Cebulski D., Poszytek A., 2010. Analiza własności zbiornikowych skał węglanowych z wykorzystaniem mikrotomografii rentgenowskiej. *Nafta-Gaz*, 8: 653–662.



Dr inż. Marek DOHNALIK
Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marek.dohnalik@inig.pl



Mgr Jan KACZMARCZYK
Analityk w sektorze bankowym.
Autor bloga www.operator-paramedyk.pl
E-mail: janek@operator-paramedyk.pl