

Ocena przydatności wykorzystania geometrycznych parametrów przestrzeni porowej z obrazów tomograficznych w kontekście pomiarów NMR, porozymetrii rtęciowej i porozymetrii helowej

The study of application of geometric parameters of the pore space from tomographic images in the context of NMR measurements, mercury porosimetry and helium porosimetry

Katarzyna Drabik¹, Paulina Krakowska-Madejska², Edyta Puskarczyk², Marek Dohnalik¹

¹Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ²AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

STRESZCZENIE: Głównym celem pracy była ocena przydatności wyników interpretacji ilościowej, uzyskanej z obrazowania wewnętrznej struktury próbek skał z wykorzystaniem metody tomografii komputerowej, do szacowania parametrów zbiornikowych takich jak porowatość czy przepuszczalność. W pracy badano zależności korelacyjne pomiędzy parametrami przestrzeni porowej uzyskanymi z analizy obrazów tomografii komputerowej a wynikami standardowych badań laboratoryjnych. Materiał badawczy składał się z próbek piaskowców czerwonego spągowca, facji eolicznej, pobranych z obszaru Niżu Polskiego. Do analiz wybrano kilkadziesiąt próbek skał piaskowców czerwonego spągowca, dla których policzono 69 parametrów. Interpretacja jakościowa i ilościowa polegała na porównaniu parametrów otrzymanych z analizy obrazu tomograficznego z wcześniej uzyskanymi wynikami analiz laboratoryjnych obejmujących następujące metody badawcze: porozymetrię helową (Por.He), spektrometrię jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR), porozymetrię rtęciową (Por.Hg) i przepuszczalność absolutną (przepuszcz). Utworzono macierze korelacji dla wszystkich dostępnych parametrów, do pracy wybrano korelacje istotne, o najwyższym współczynniku korelacji liniowej. Zaobserwowano istotne zależności liniowe pomiędzy parametrami wyznaczonymi z analizy obrazów CT i innych metod badawczych. Uzyskano modele pozwalające na szacowanie przepuszczalności, porowatości i zawartości wody nieredukowalnej na podstawie parametrów geometrycznych otrzymanych z obrazów tomograficznych (współczynnik kształtu, charakterystyka Eulera czy powierzchnia właściwa). W efekcie możliwe jest wstępne oszacowanie parametrów petrofizycznych jedynie na bazie wyników z nieniszczącej metody CT. W przypadku obrazowania tomograficznego pełnych rdzeni uzyskane związki pozwalają na wstępną estymację rozkładu porowatości i gęstości objętościowej w całym rdzeniu, co może być pomocne podczas typowania miejsc do poboru próbek rdzeni przeznaczonych do szczegółowych badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa, czerwony spągowiec, NMR, porozymetria, poROSE.

ABSTRACT: The main purpose of the study was to assess the usefulness of the results of quantitative interpretation of computed tomography (CT) images of rocks' pore structure for the estimation of reservoir parameters, such as porosity and permeability. This study presents results of correlation analyses between the pore space parameters obtained from the analysis of computed tomography images and the results of standard laboratory tests. The research material consisted of samples representing Rotliegend sandstones of aeolian facies, collected from core material from wells located in the Fore-Sudetic Monocline. Several dozen samples were selected for analysis, for which 69 parameters were calculated. The qualitative and quantitative interpretation consisted in comparing the parameters obtained from the analysis of the tomographic images with the previously obtained results of laboratory analyzes including the following research methods: helium porosimetry (Por.He), nuclear magnetic resonance spectrometry (NMR), mercury porosimetry (Por.Hg) and absolute permeability (let it pass). Correlation matrices for all available parameters were determined, significant correlations with the highest coefficient of linear correlation were selected as a subject of this work. Significant linear relationships were observed between the parameters determined from the analysis of CT images and other research methods. Models that were obtained allowed to estimate the permeability, porosity, and irreducible water content based on geometrical parameters obtained from tomographic images (shape factor, Euler characteristic or specific surface area). The important result of this work is the possibility to estimate petrophysical parameters based on the results of the non-destructive CT method only. In the case of tomographic imaging of whole cores, the obtained

Autor do korespondencji: K. Drabik, e-mail: katarzyna.drabik@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 16.09.2021 r. Zatwierdzono do druku: 09.11.2021 r.

results allow for a preliminary estimation of the porosity and volume density distribution in the entire core, which may be helpful in selecting representative samples of core for detailed laboratory tests.

Key words: computed X-ray tomography, Permian Rotliegend Sandstone, NMR, mercury porosimetry, poROSE.

Wprowadzenie

Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) odgrywa obecnie znaczącą rolę w identyfikacji przestrzeni porowej i szczelinowej skał (Karpyn et al., 2009; Ohser i Schladitz, 2009; Cnudde i Boone, 2013; Guo et al., 2015; Soullaine et al., 2016; Wang et al., 2016; Backeberg et al., 2017; Kaczmarek et al., 2017; Lu et al., 2018). Tworzone i aktualizowane jest oprogramowanie pozwalające na przetwarzanie i interpretację obrazów tomograficznych, nie tylko obiektów medycznych, ale również skał, silników, ogniw czy też części kluczowych aparatur badawczych i przemysłowych (np. akcelerometry).

Pomysł na realizację niniejszej pracy zrodził się z potrzeby analizy przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca. Utwory te, charakteryzujące się stosunkowo dużymi porowatościami oraz niewielką przepuszczalnością, traktowane są jako skały zbiornikowe typu *tight* lub niskoprzepuszczalne. W ramach pracy połączono wyniki różnych badań laboratoryjnych porozymetrii helowej (Por.He), spektrometrii jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) i porozymetrii rtęciowej (Por.Hg) z analizą obrazu tomograficznego (CT) struktury porowej próbek skał. Przedstawiono również możliwości określenia ciągłego rozkładu porowatości i gęstości z CT wykonanego wzdłuż osi całego rdzenia.

Wynikiem tych analiz jest oszacowanie modeli łączących parametry uzyskane różnymi metodami badawczymi oraz ocena możliwości aplikacyjnych posiadanych przez INiG – PIB programu poROSE (poROSE, 2019), przeznaczonego do przetwarzania i interpretacji obrazów tomograficznych skał. Wiele parametrów geometrycznych wyliczanych z wykorzystaniem oprogramowania poROSE ma zastosowanie pod kątem oceny parametrów petrofizycznych skał. Niewątpliwą zaletą tego oprogramowania jest fakt, że zostało ono stworzone z myślą o zastosowaniu w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku (Krakowska et al., 2018; Madejski et al., 2018), a wyznaczone parametry odzwierciedlają cechy fizyczne przestrzeni porowej i szkieletu skał.

Materiał badawczy

Materiał badawczy obejmował 31 próbek rdzeni pobranych z piaskowcowych utworów górnego czerwonego spągowca, pochodzenia eolicznego, z otworów wiertniczych zlokalizowanych na obszarze monokliny przedsudeckiej (Dohnalik, 2013). Próbkę zostały dobrane tak (tab. 1), aby reprezentować różne rejony ergu wschodniego basenu permjskiego czerwonego spągowca (Kiersnowski, 1997; Kiersnowski i Buniak, 2006; Kiersnowski

Tabela 1. Podział materiału badawczego (*KP* – współczynnik porowatości [%], *K* – współczynnik przepuszczalności [mD])

Table 1. Division of the research material (*KP* – porosity [%], *K* – absolute permeability [mD])

Współczynniki porowatości i przepuszczalności	Rejon	Numer próbki	Własności zbiornikowe	Rejon	Numer próbki	Własności zbiornikowe	Rejon	Numer próbki	Własności zbiornikowe
	rejon 1	7480	średnie	rejon 2	8938	dobre	rejon 3	12898	niskie
		7436			8939			12903	
		9882			8941			12904	
		9891			8947			12906	
		9892			8949			12913	
		9893			8968			12916	
		9896			9509			12917	
		6331			9227			12918	
		6333			9230			12919	
		6395			9233			12922	
				12928					
Średnia <i>KP</i> [%]		10,50		15,40		11,70			
Średnia <i>K</i> [mD]:									
– arytmetyczna		11,90		31,80		0,53			
– geometryczna		1,73		10,30		0,19			

et al., 2010; Dohnalik i Ziemianin, 2020). Dodatkowo wykonano skan całego rdzenia w celu ukazania profilu zmian porowatości gęstości wyznaczonych z obrazowania CT.

Rejon 1 obejmuje obszar reprezentowany przez otwory znajdujące się w części brzeżnej ergu wschodniego, natomiast rejon 2 i 3 – w jego środkowej części. Rejon 1 zlokalizowany jest w obszarze wyklinowywania utworów czerwonego spągowca na wyniesienie wolsztyńskie; ze względu na położenie w strefie krawędziowej basenu charakteryzuje się zmiennym wykształceniem litologiczno-facjalnym. Piaskowce eoliczne wybrane do badań z rejonów 2 i 3 cechują się dużym zróżnicowaniem facjalnym, od facji eolicznych wydmych, międzywydmowych fluwialnych i aluwialnych w rejonie 2 do facji eolicznych wydmych w rejonie 3. Mimo obecności w rejonie 2 zlepieńców facji fluwialnych i aluwialnych wybrane do badań piaskowce z tego rejonu wykazują najwyższe z badanych parametry zbiornikowe. Przestrzeń porowa piaskowców w poszczególnych rejonach różni się wykształceniem i własnościami zbiornikowymi. Piaskowce facji eolicznej z rejonów 2 i 3 (rys. 1) wykazują własności zbiornikowe od dobrych (średnia porowatość wynosi 15,4%, średnia arytmetyczna przepuszczalność: 31,8 mD, średnia geometryczna przepuszczalność: 10,3 mD) w rejonie 2 do niskich (średnia porowatość wynosi 11,7%, średnia przepuszczalność: 0,53 mD, średnia geometryczna przepuszczalność: 0,19 mD) w rejonie 3. Rejon 1 charakteryzuje się pośrednimi (średnia porowatość wynosi 10,5%, średnia przepuszczalność: 11,9 mD, średnia geometryczna przepuszczalność: 1,73 mD) parametrami zbiornikowymi.

Metodyka prac interpretacyjnych

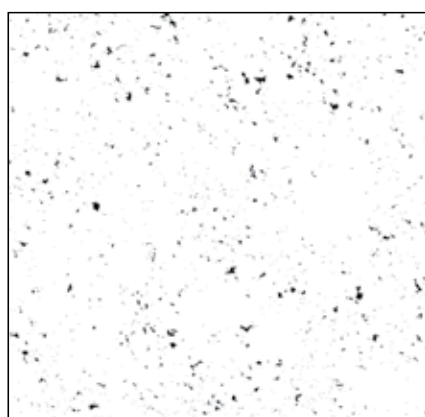
Na wszystkich dostępnych próbkach wykonano badania tomograficzne, które następnie analizowano z wykorzystaniem

oprogramowania poROSE. Przykładowe zbinaryzowane przekroje reprezentatywne dla danego rejonu próbek piaskowca czerwonego spągowca przedstawiono na rysunku 1.

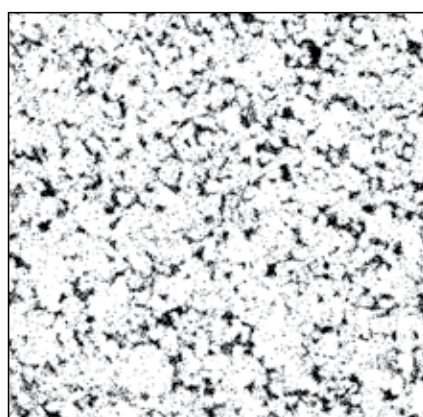
Pierwszy etap prac interpretacyjnych obejmował wykonanie obliczeń parametrów zbiornikowych i geometrycznych przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca w programie poROSE na podstawie obrazów z CT (Krakowska et al., 2016; Shiqi et al., 2017). Zastosowano moduł do obliczenia parametrów geometrycznych dla poszczególnych obiektów (tu: porów) (ang. *object parameters*), liczby koordynacyjnej każdego z wyróżnionych obiektów (ang. *coordination number*), a także krętości kanałów porowych (ang. *tortuosity with plane connections*) z zastosowaniem algorytmu tzw. osi centralnej, czyli osi przechodzącej przez środek obiektu w 3D i spełniającej warunek połączenia z co najmniej dwoma ścianami modelu (próbki). Wyniki CT uzyskano dla każdego obiektu (pory), stąd obliczono wartości średnie dla próbki, aby móc je skorelować z wynikami z innych metod laboratoryjnych (Vásárhelyi et al., 2020; Krakowska-Madejska et al., 2021). Parametry wyrażone są w wokselach (np. *Volume*, czyli objętość obiektu) lub pikselach (np. *Thickness*, czyli grubość obiektu, będąca średnicą obiektu). Dysponowano także wynikami badań spektrometrii magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR), piknometrii helowej (Por.He) i porozymetrii rtęciowej (Por.Hg).

Opis parametrów oznaczonych na bazie obrazów tomograficznych i innych badań laboratoryjnych wykorzystanych do analiz korelacyjnych został przedstawiony w tabeli 2. Uzyskano w sumie 69 parametrów charakteryzujących przestrzeń porową, z czterech niezależnych technik badawczych.

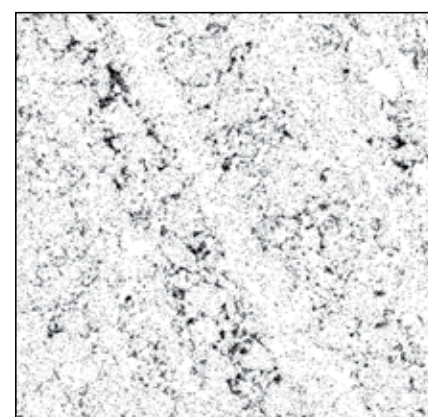
Drugi etap prac obejmował stworzenie macierzy korelacji uzyskanych parametrów i ich interpretację. Zastosowano macierz korelacji w celu zaobserwowania istotnych związków między badanymi parametrami. W trakcie analizy przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca skupiono się głównie na związku parametrów CT z parametrami ze spektrometrii



próbka z rejonu 1



próbka z rejonu 2



próbka z rejonu 3

Rys. 1. Przykładowe zbinaryzowane przekroje wybranych próbek

Fig. 1. Exemplary images of binarized slices of the selected samples

magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR), porozymetrii helowej oraz porozymetrii rtęciowej. Do stworzenia macierzy korelacji zastosowano próbki z pełnym pakietem wyników z wszystkich metod. Szczegółowa analiza pozwoliła zaobserwować interesujące związki korelacyjne pomiędzy parametrami uzyskanymi z analizy obrazu a NMR, Por.He i Por.Hg.

Tabela 2. Parametry uzyskane z analizy obrazów CT, a także z NMR, porozymetrii helowej, porozymetrii rtęciowej dla analizowanych próbek piaskowca czerwonego spągowca

Table 2. Parameters obtained from the analysis of CT images, as well as from NMR, helium porosimetry, mercury porosimetry for the analyzed samples of the Rotliegend Sandstone

Lp.	Parametr	Opis parametru
1.	Volume	liczba wokseli w obiekcie, objętość, program poROSE
2.	Surface Area	pole powierzchni obiektu wyrażone w wokselah, które bezpośrednio sąsiadują z otoczeniem obiektu, program poROSE
3.	Surface Area from Equation	pole powierzchni obiektu obliczone na podstawie średnicy maksymalnej Fereta i objętości obiektu ($SA = 2/FeretMax/objętość$), program poROSE
4.	Equivalent Diameter	średnica ekwiwalentna, średnica kuli o objętości równej objętości obiektu, program poROSE
5.	Sphericity	określa podobieństwo kształtu obiektu do kształtu sferycznego za pomocą odpowiedniego stosunku objętości obiektu do powierzchni obiektu, program poROSE
6.	Centroid X	współrzędna X środka ciężkości obiektu, program poROSE
7.	Centroid Y	współrzędna Y środka ciężkości obiektu, program poROSE
8.	Centroid Z	współrzędna Z środka ciężkości obiektu, program poROSE
9.	Thickness Max	maksymalna wartość grubości znaleziona w obiekcie, program poROSE
10.	Thickness Min	minimalna wartość grubości znaleziona w obiekcie, program poROSE
11.	Thickness Mean	średnia grubość obiektu, program poROSE
12.	Thickness Std	odchylenie standardowe grubości, program poROSE
13.	Orientation X	wartość wektora własnego w kierunku X do największej wartości tensora bezwładności, program poROSE
14.	Orientation Y	wartość wektora własnego w kierunku Y do największej wartości tensora bezwładności, program poROSE
15.	Orientation Z	wartość wektora własnego w kierunku Z do największej wartości tensora bezwładności, program poROSE
16.	Anisotropy	parametr określający odstępstwo kształtu obiektu od sfery, program poROSE
17.	Elongation	wydłużenie obiektu, program poROSE
18.	Flatness	płaskość obiektu, program poROSE
19.	Euler Sum	charakterystyka Eulera, program poROSE
20.	Feret Min	najkrótsza średnica Fereta, najkrótsza długość obiektu mierzona w danym kierunku, program poROSE
21.	Feret Max	najdłuższa średnica Fereta, najdłuższa długość obiektu mierzona w danym kierunku, program poROSE
22.	Feret Breadth	maksymalna średnica Fereta wyznaczona w kierunku prostopadłym do prostej określonej przez najdłuższą średnicę Fereta w obiekcie, program poROSE
23.	Feret Shape	stosunek maksymalnej długości średnicy Fereta wyznaczonej w kierunku prostopadłym do prostej określonej przez najkrótszą średnicę Fereta do długości najkrótszej średnicy Fereta, program poROSE
24.	Ellipsoid Center X	współrzędna X środka ciężkości elipsoidy wpisanej/opisanej w obiekt, program poROSE
25.	Ellipsoid Center Y	współrzędna Y środka ciężkości elipsoidy wpisanej/opisanej w obiekt, program poROSE
26.	Ellipsoid Center Z	współrzędna Z środka ciężkości elipsoidy wpisanej/opisanej w obiekt, program poROSE
27.	Ellipsoid Short Radius	krótki promień elipsoidy wpisanej/opisanej w obiekt, program poROSE
28.	Ellipsoid Intermediate Radius	średni promień elipsoidy wpisanej/opisanej w obiekt, program poROSE
29.	Ellipsoid Long Radius	długi promień elipsoidy wpisanej/opisanej w obiekt, program poROSE
30.	Surface Mesh Area	pole powierzchni obiektu liczone po siatce trójkątów, program poROSE
31.	Surface Mesh Area Triangle Count	liczba trójkątów siatki zbudowanej na obiekcie, program poROSE
32.	ShapeVa3D	współczynnik kształtu, liczony na podstawie powierzchni obiektu i pola przekroju kształtu obiektu, program poROSE
33.	ShapeVa3D Mesh	współczynnik kształtu, liczony na podstawie powierzchni obiektu i pola przekroju kształtu obiektu zbudowanego z siatki trójkątów, program poROSE
34.	Effective Porosity	porowatość efektywna z analizy obrazu, program poROSE
35.	Enclosed Volume	objętość obiektu zamknięta siatką trójkątów, program poROSE

cd. Tabela 2/ cont. Table 2

Lp.	Parametr	Opis parametru
36.	Pore Shape Factor	stosunek najkrótszego promienia elipsoidy do najdłuższego promienia elipsoidy, program poROSE
37.	Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	stosunek średnicy maksymalnej (pory) do średnicy minimalnej (gardziele porowe) sfery wpisanej w oś centralną obiektu, program poROSE
38.	NMRCALK-CT	różnica wartości pomiędzy współczynnikiem porowatości całkowitej uzyskanym metodą NMR i z analizy obrazu [%]
39.	ACC-CT	różnica wartości pomiędzy współczynnikiem porowatości całkowitej uzyskanym metodą piknometrii helowej i z analizy obrazu [%]
40.	Hg-CT	różnica wartości pomiędzy współczynnikiem porowatości uzyskanym metodą porozymetrii rtęciowej i z analizy obrazu [%]
41.	kp1	zawartość wody nieredukowalnej, określona metodą NMR [%]
42.	kp2	zawartość wody kapilarnej, określona metodą NMR [%]
43.	kp3	zawartość wody wolnej, określona metodą NMR [%]
44.	Por.calkowita	współczynnik porowatości całkowitej, określony metodą NMR [%]
45.	Por.efektywna	współczynnik porowatości efektywnej, określony metodą NMR [%]
46.	Wsp.wod.niereduk.	współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną, określony metodą NMR [%]
47.	Por.He	współczynnik porowatości całkowitej, określony metodą piknometrii helowej [%]
48.	Przepuszcz.	wartość przepuszczalności absolutnej [mD]
49.	LogK	wartość logarytmu przepuszczalności absolutnej [mD]
50.	Por.Hg	współczynnik porowatości całkowitej uzyskany metodą porozymetrii rtęciowej [%]
51.	porHG>6µm	udział rtęci wtłoczonej do gardzieli o średnicy większej niż 6 µm [%]
52.	śr.kapilara	średnica średniej kapilary [µm]
53.	pory>1µm	udział porów o średnicy powyżej 1 µm [%]
54.	Jednorodność(Hg-He)/Hg	stopień jednorodności, określony jako moduł z wartości różnicy pomiędzy wartością porowatości z porozymetrii rtęciowej i helowej podzielonej przez wartość porowatości z porozymetrii rtęciowej
55.	MIN tau	minimalna wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej na podstawie analizy szkieletu i wyodrębnienia wartości krętości dla każdej gałęzi w szkielecie przestrzeni porowej, program poROSE
56.	MAX tau	maksymalna wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej na podstawie analizy szkieletu i wyodrębnienia wartości krętości dla każdej gałęzi w szkielecie przestrzeni porowej, program poROSE
57.	Średnia tau	średnia wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej na podstawie analizy szkieletu i wyodrębnienia wartości krętości dla każdej gałęzi w szkielecie przestrzeni porowej, program poROSE
58.	Mediana tau	mediana wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej na podstawie analizy szkieletu i wyodrębnienia wartości krętości dla każdej gałęzi w szkielecie przestrzeni porowej, program poROSE
59.	Od St tau	odchylenie standardowe wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej na podstawie analizy szkieletu i wyodrębnienia wartości krętości dla każdej gałęzi w szkielecie przestrzeni porowej, program poROSE
60.	tau MAVI X	wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej w kierunku X, program MAVI
61.	tau MAVI Y	wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej w kierunku Y, program MAVI
62.	tau MAVI Z	wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej w kierunku Z, program MAVI
63.	Max Junction Sample	maksymalna liczba skrzyżowań zidentyfikowana w próbce na obiektach, wynik analizy szkieletu, program poROSE
64.	Ave. Junction Sample	średnia liczba skrzyżowań zidentyfikowana w próbce na obiektach, wynik analizy szkieletu, program poROSE
65.	Std Dev. Junction Sample	odchylenie standardowe z liczby skrzyżowań zidentyfikowana w próbce na obiektach, wynik analizy szkieletu, program poROSE
66.	Max CN Sample	maksymalna wartość liczby koordynacyjnej liczonej jako liczba gałęzi wychodząca ze skrzyżowania, program poROSE
67.	Ave. CN Sample	średnia wartość liczby koordynacyjnej liczonej jako liczba gałęzi wychodząca ze skrzyżowania, program poROSE
68.	Std Dev. CN Sample	odchylenie standardowe średniej wartości liczby koordynacyjnej liczonej jako liczba gałęzi wychodząca ze skrzyżowania, program poROSE
69.	Tortuosity CA	średnia wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej zgodnie z osią centralną obiektów wykazujących połączenie ze ścianami próbki, program poROSE.

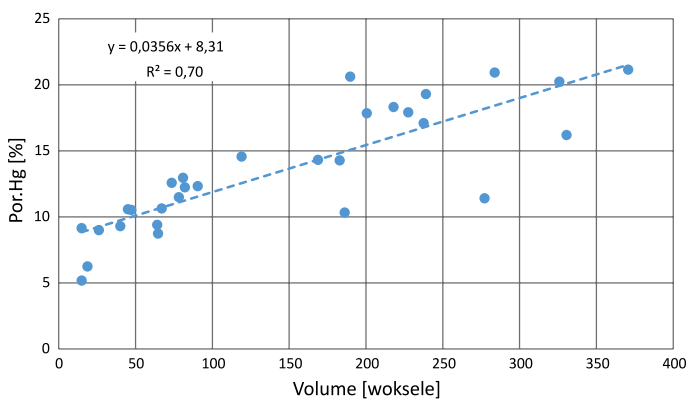
Analiza wyników badań

Przebadano związki między wszystkimi parametrami (69 parametrów z czterech niezależnych metod badawczych, tab. 2), natomiast w artykule przedstawiono i przeanalizowano wyniki tylko dla tych relacji, które były istotne i dla których uzyskano najwyższe współczynniki korelacji.

Parametr objętość (Volume)

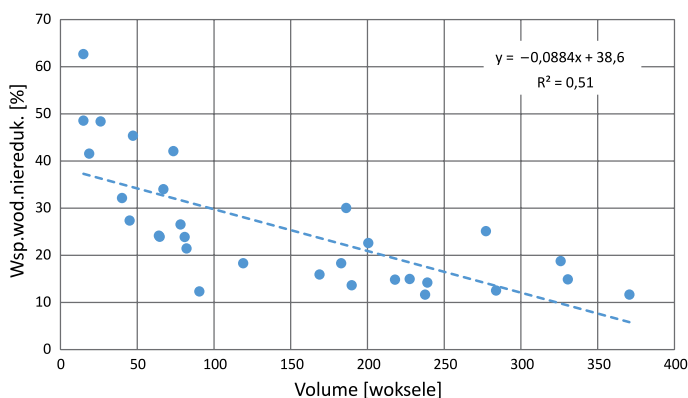
Objętość (Volume) najsilniej koreluje z: kp3 ($R^2 = 0,69$), Por.całkowita ($R^2 = 0,61$), Por.efektywna ($R^2 = 0,74$), Wsp.wod.niereduk. ($R^2 = 0,50$), Por.He ($R^2 = 0,58$), Por.Hg ($R^2 = 0,70$), porHG>6µm ($R^2 = 0,61$)

Parametr objętości koreluje z porowatościami wyznaczonymi z różnych metod pomiarowych, przy czym najsilniej z porowatością efektywną (Por.efektywna i Por.Hg) (rys. 2–3).



Rys. 2. Związek Por.Hg z Volume

Fig. 2. Relationship of Por.Hg (porosity from mercury porosimetry) with Volume



Rys. 3. Związek Wsp.wod.niereduk. z Volume

Fig. 3. Relationship of Wsp.wod.niereduk. (irreducible water) with Volume

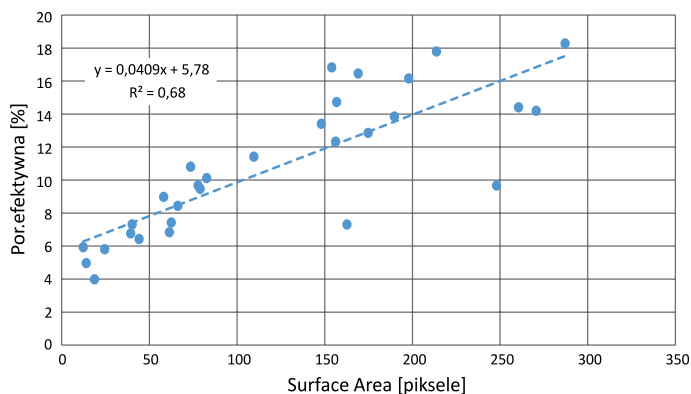
Objętość obiektów jest bezpośrednio związana z porowatością, stąd korelacje są uzasadnione. Objętość wykazuje też silną korelację z zawartością wody wolnej kp3. Zaobserwowano także liniowy trend relacji objętości z współczynnikiem nasycenia

wodą nieredukowalną (Wsp.wod.niereduk.). Objętość natomiast nie korelowała z zawartością wody w minerałach ilastych kp1. Istotną korelację tworzy objętość z udziałem rtęci wtłoczonej do gardzieli o średnicy większej niż 6 µm (porHG>6µm). Ma to swoje odzwierciedlenie w związkach z porowatościami.

Pole powierzchni obiektu (Surface Area)

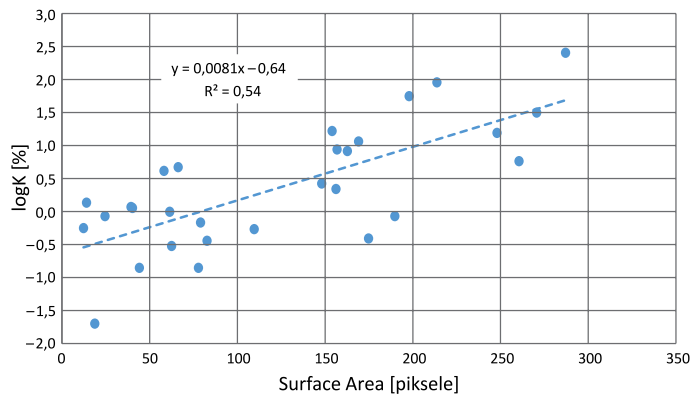
Pole powierzchni obiektu (Surface Area) silnie koreluje z: kp3 ($R^2 = 0,60$), Por.całkowita ($R^2 = 0,53$), Por.efektywna ($R^2 = 0,68$), Wsp.wod.niereduk. ($R^2 = 0,51$), Por.He ($R^2 = 0,53$), logK ($R^2 = 0,47$), Por.Hg ($R^2 = 0,65$), porHG>6µm ($R^2 = 0,52$)

Dla parametru pole powierzchni obiektu zaobserwowano podobne korelacje z pozostałymi parametrami jak w przypadku parametru objętość. Jest to w pełni uzasadnione, gdyż pole powierzchni jest liczone po objętości obiektu. Najsilniej pole powierzchni koreluje z porowatością efektywną (Por.efektywna, Por.Hg) (rys. 4), tak jak i w przypadku objętości. Ponadto zaobserwowano korelację pola powierzchni z logarytmem przepuszczalności. Współczynnik determinacji nie jest wysoki, przyjmuje wartość $R^2 = 0,54$ (rys. 5). Należy zwrócić uwagę, że jest to jedyny, spośród analizowanych, związek parametru



Rys. 4. Związek Por.efektywna z Surface Area

Fig. 4. Relationship of Por.efektywna (effective porosity) with Surface Area



Rys. 5. Związek logK z Surface Area

Fig. 5. Relationship of logK (logarithm of absolute permeability) with Surface Area

z analizy obrazu z przepuszczalnością absolutną, który wykazuje dość wysoki współczynnik determinacji.

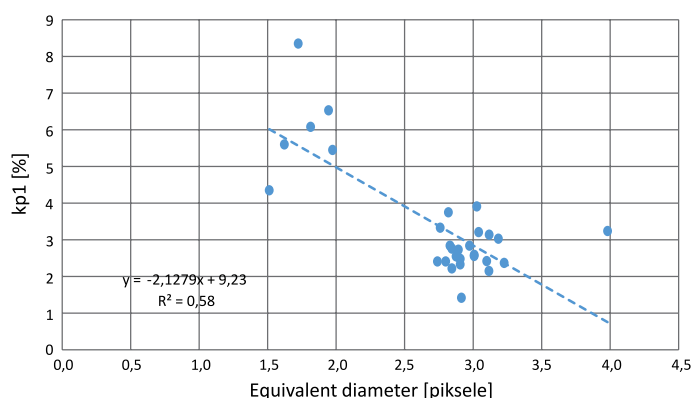
Model liniowy może zostać zastosowany do wstępnej predykcji przepuszczalności absolutnej w piaskowcach czerwonego spągowca (1):

$$\log K = 0,0081 \cdot \text{Surface Area} - 0,6433 \text{ dla } R^2 = 0,54 \quad (1)$$

Średnica ekwiwalentna (Equivalent Diameter)

Średnica ekwiwalentna (Equivalent Diameter) koreluje z: kp1 ($R^2 = 0,58$)

Średnica ekwiwalentna w zestawieniu z zawartością wody zamkniętej w minerałach ilastych kp1 (rys. 6) wykazuje grupowanie punktów. Na wykresie można zaobserwować dwie grupy punktów: pierwszą o wysokich wartościach kp1 i drugą o niskich wartościach kp1. W grupie 1, o wysokich kp1, znalazły się próbki z rejonu 1 (średnie wartości parametrów zbiornikowych). Samodzielnie grupy punktów 1 (rejon 1) i 2 (rejon 2) nie tworzą związku korelacyjnego ze średnicą ekwiwalentną, stąd uznaje się niską wiarygodność tej zależności.



Rys. 6. Związek zawartości kp1 (wody zamkniętej w minerałach ilastych) ze średnicą ekwiwalentną

Fig. 6. Relationship of kp1 (capillary bound water) with Equivalent diameter

Charakterystyka Eulera (Euler Sum)

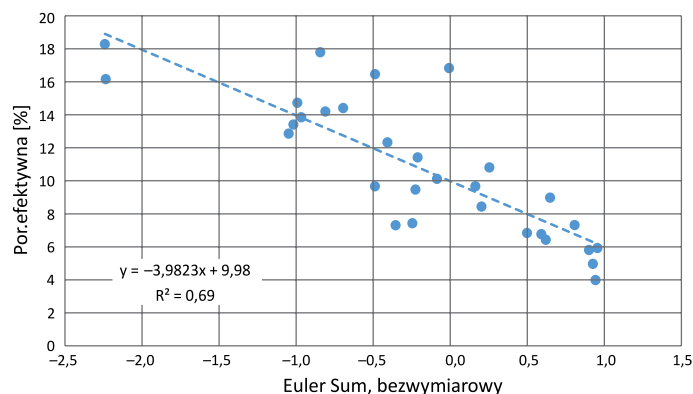
Charakterystyka Eulera (Euler Sum) koreluje z: kp3 ($R^2 = 0,52$), Por.całkowita ($R^2 = 0,51$), Por.efektywna ($R^2 = 0,69$), Wsp.wod.niereduk. ($R^2 = 0,58$), Por.He ($R^2 = 0,50$), Por.Hg ($R^2 = 0,65$)

W przypadku charakterystyki Eulera zidentyfikowano 6 istotnych zależności korelacyjnych z parametrami zbiornikowymi z innych metod badawczych (rys. 7–10). Wartości dodatnie charakterystyki Eulera oznaczają, że struktura porowa jest słabo połączona, natomiast wartości ujemne wskazują na strukturę porową posiadającą wiele połączeń pomiędzy porami. Wzrost charakterystyki Eulera wiąże się ze spadkiem wartości kp3, Por.całkowita, Por.efektywna, Por.He, Por.Hg, natomiast ze wzrostem Wsp.wod.niereduk. Zaobserwowane korelacje są

silne, zwłaszcza z Por.efektywna i Por.Hg, co bezpośrednio wiąże się z specyfiką parametru Eulera. Im wyższy parametr, tym gorsze połączenia między porami, tym niższe wartości porowatości efektywnej. Związek charakterystyki Eulera z Por.efektywna i Por.Hg może być zastosowany do wstępnego szacowania porowatości efektywnej w piaskowcach czerwonego spągowca (2) i (3):

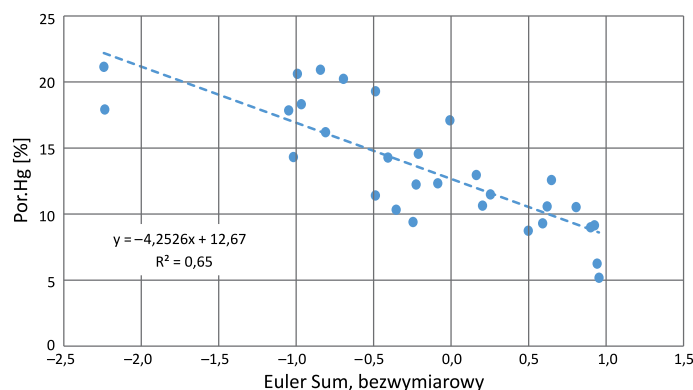
$$\text{Por.efektywna} = -3,9823 \cdot \text{Euler Sum} + 9,9778 \quad (2)$$

$$\text{Por.Hg} = -4,2526 \cdot \text{Euler Sum} + 12,666 \quad (3)$$



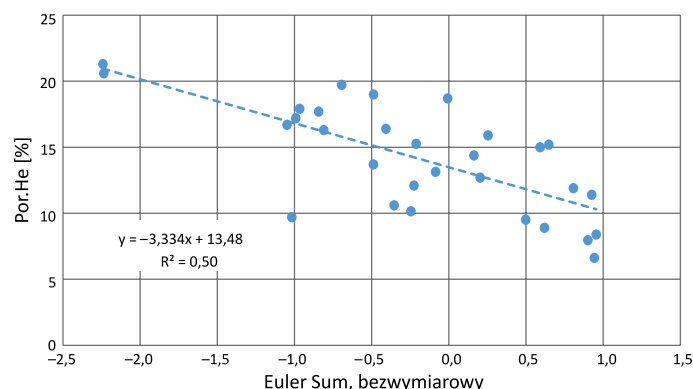
Rys. 7. Związek Por.efektywna z Euler Sum

Fig. 7. Relationship of Por.efektywna (effective porosity) with Euler Sum



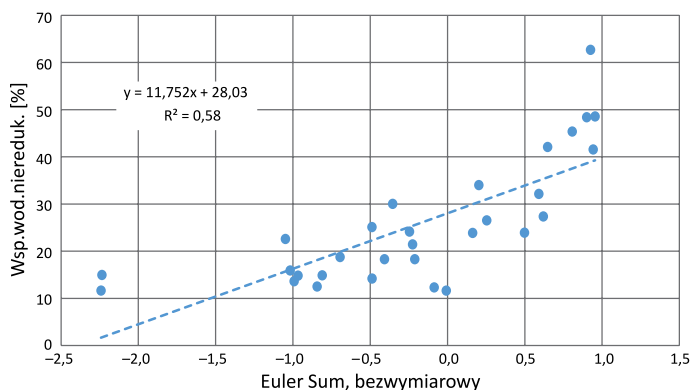
Rys. 8. Związek Por.Hg z Euler Sum

Fig. 8. Relationship of Por.Hg (MICP porosity) with Euler Sum



Rys. 9. Związek Por.He z Euler Sum

Fig. 9. Relationship of Por.He (helium pycnometry porosity) with Euler Sum



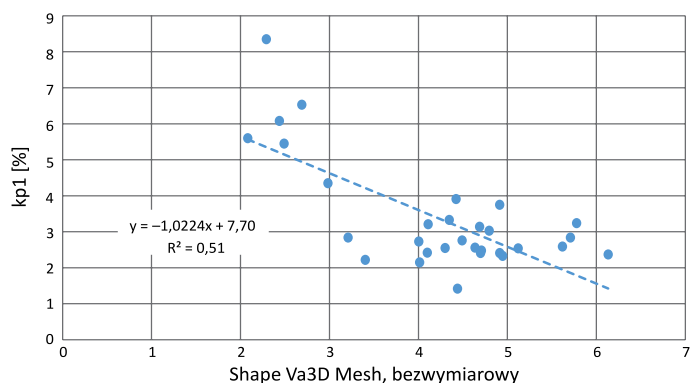
Rys. 10. Związek Wsp.wod.niereduk. z Euler Sum

Fig. 10. Relationship of Wsp.wod.niereduk (irreducible water content) with Euler Sum

Współczynnik kształtu (ShapeVa3D Mesh)

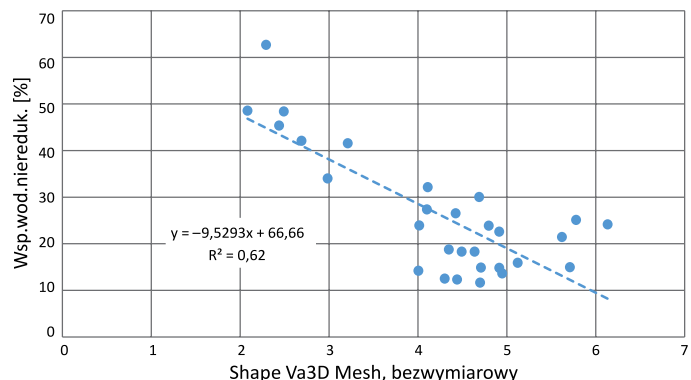
Współczynnik kształtu (ShapeVa3D Mesh) koreluje z: kp1 ($R^2 = 0,51$), Wsp.wod.niereduk. ($R^2 = 0,62$)

Współczynnik kształtu, liczony na podstawie powierzchni obiektu i pola przekroju kształtu obiektu zbudowanego z siatki trójkątów, buduje związki z zawartością wody związanej w minerałach ilastych kp1 i współczynnikiem nasycenia wodą nieredukowalną Wsp.wod.niereduk.



Rys. 11. Związek kp1 z ShapeVa3D Mesh

Fig. 11. Relationship of kp1 (capillary bound water) with ShapeVa3D Mesh



Rys. 12. Związek Wsp.wod.niereduk. z ShapeVa3D Mesh

Fig. 12. Relationship of Wsp.wod.niereduk. (irreducible water content) with ShapeVa3D Mesh

Zaobserwowane relacje mogą być wykorzystane do wstępnej estymacji parametrów kp1 i Wsp.wod.niereduk. na podstawie ShapeVa3D Mesh (rys. 11–12) z nieniszczącej metody CT (4) i (5):

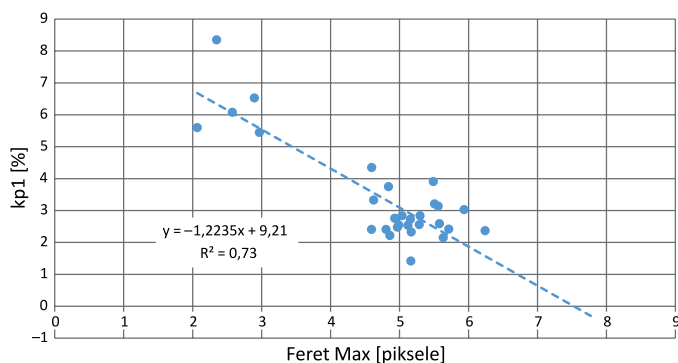
$$kp1 = -1,0224 \cdot \text{ShapeVa3D Mesh} + 7,6963 \quad (4)$$

$$\text{Wsp.wod.niereduk.} = -8,9908 \cdot \text{ShapeVa3D} + 63,635 \quad (5)$$

Najdłuższa średnica Fereta (Ferret Max)

Najdłuższa średnica Fereta (Ferret Max) koreluje z: kp1 ($R^2 = 0,59$)

Najdłuższa średnica Fereta koreluje z zawartością wody związanej w minerałach ilastych kp1 (rys. 13), wartość współczynnika determinacji wynosi $R^2 = 0,73$. Widoczne jest także grupowanie się punktów, jak w przypadku innych wymienionych wyżej związków, na grupę o wysokich i niskich kp1. Jednakże zauważalny jest wzrost maksymalnej średnicy Fereta przy spadku wartości kp1.



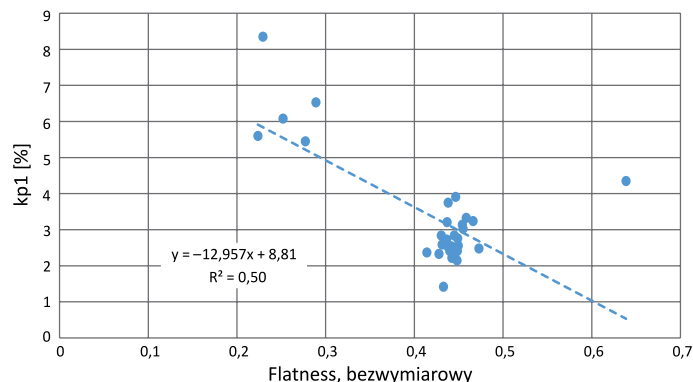
Rys. 13. Związek kp1 z Ferret Max

Fig. 13. Relationship of kp1 (capillary bound water) with Ferret Max

Splaszczanie (Flatness)

Splaszczanie (Flatness) koreluje z: kp1 ($R^2 = 0,50$)

Splaszczanie buduje zależność z kp1 na takiej samej zasadzie, jak parametry Orientation i Equivalent diameter wykazują grupowanie punktów (rys. 14).



Rys. 14. Związek kp1 z Flatness

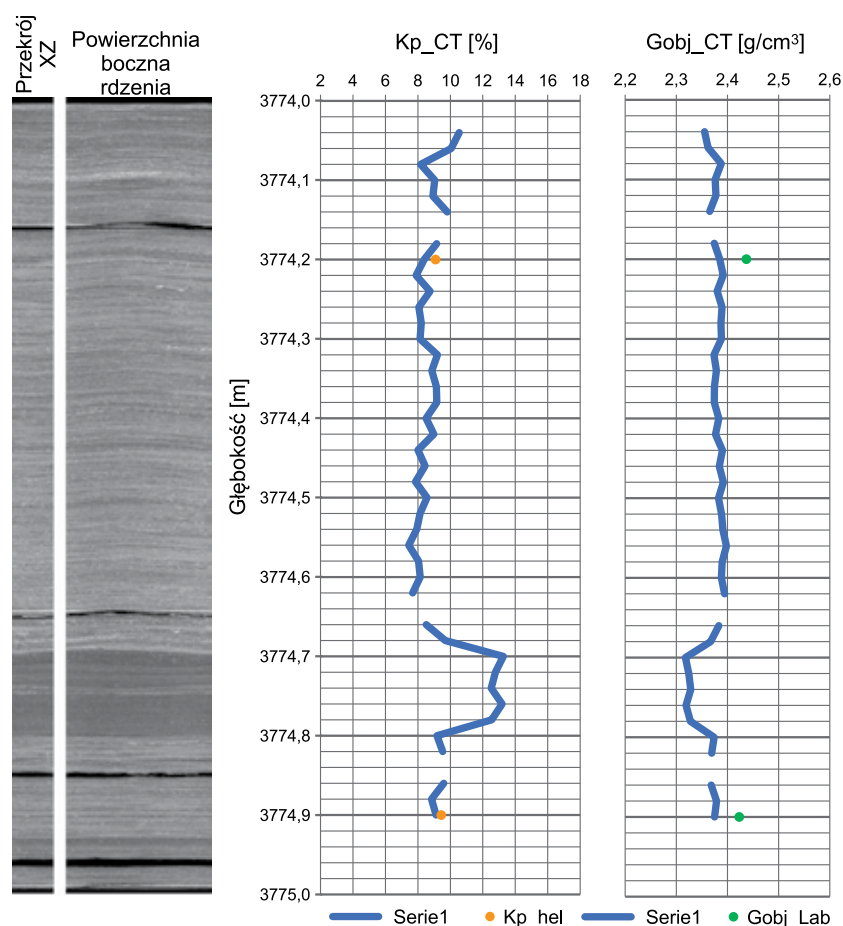
Fig. 14. Relationship of kp1 (capillary bound water) with Flatness

Zastosowanie programu poROSE do analizy struktury rdzeni wiertniczych

W analizie wewnętrznej struktury rdzeni wiertniczych często wykorzystuje się zdjęcie przedstawiające rozwinięcie pobocznic rdzenia, umożliwiające jakościową analizę struktury rdzenia wiertniczego. Następnie możliwe jest wyliczenie zmian gęstości objętościowej oraz porowatości całkowitej wzdłuż osi rdzenia (Wolański et al., 2016). Zanim powstało oprogramowanie poROSE, powyższe informacje otrzymywano za pomocą osobnych algorytmów, działających w środowisku DOS. Algorytmy te zostały napisane przez prof. dr. hab. Zbysława Tabora (AGH w Krakowie) i zapewniały zawsze wysoką wiarygodność wyznaczanych parametrów. Jedynym mankamentem tego rozwiązania była jego czasochłonność – potrzeba półautomatycznego wyznaczania parametrów. Oprogramowanie poROSE zawiera w sobie te funkcjonalności: rozwinięcie pobocznic rdzenia i otrzymanie wartości umożliwiających wyznaczanie zmian gęstości objętościowej

i porowatości całkowitej wzdłuż osi rdzenia. Zaletą stosowania tego oprogramowania jest jego obsługa bezpośrednio w środowisku Windows, co znacznie ułatwia i przyspiesza otrzymywanie danych.

Rysunek 15 zawiera przykładowy komplet informacji dla 1 mb rdzenia, wykonanych w interwale występowania piaskowcowych utworów czerwonego spągowca. Po lewej stronie przedstawiono przekrój przez jego strukturę, następnie rozwinięcie oraz dwa profile – współczynnika porowatości całkowitej oraz gęstości objętościowej. Zarówno przekrój, jak i rozwinięcie w skali szarości – reprezentują zmienność współczynnika absorpcji/gęstości poszczególnych fragmentów rdzenia wiertniczego. Kolor biały świadczy o występowaniu większej absorpcji promieniowania rentgenowskiego w danym fragmencie rdzenia, a kolor szary – mniejszej. Całkiem czarne fragmenty widoczne są w miejscu, w którym rdzeń jest spękany. Profile zmian porowatości całkowitej i gęstości objętościowej utworzono z krokiem równym wielkości 2,5 cm (około 1 cala). W ten sposób odpowiada on wielkości standardowo mierzonych w laboratorium próbek rdzeni. Na całej długości rdzeń charakteryzuje się drobnymi zmianami wartości porowatości całkowitej i gęstości objętościowej. Natomiast od głębokości 3774,70–3774,80 m widoczna jest wyraźna zmiana wartości tych parametrów, prawdopodobnie związana ze zmianą litologii.



Rys. 15. Od lewej strony przedstawiono obraz tomograficzny ilustrujący przekrój rdzenia piaskowca, kolejno rozwinięcie pobocznic rdzenia oraz dwa profilowania: zmian wartości porowatości całkowitej i gęstości objętościowej wzdłuż osi rdzenia

Fig. 15. On the left – a tomographic image showing the cross-section of the sandstone core, next – the expansion of the core side surface and two logs: changes in the value of total porosity and bulk density along the core axis

Podsumowanie i wnioski

Rentgenowska tomografia komputerowa jest niezwykle istotnym narzędziem w rozpoznawaniu struktury porowej skał. Jej główną zaletą jest nieniszczący charakter, a także analizy struktury porowej skał w wersji 3D.

Realizacja prac nad wynikami badań laboratoryjnych piaskowców czerwonego spągowca pozwoliła potwierdzić możliwości aplikacyjne programu poROSE do obrazowania zmian struktury rdzenia wiertniczego oraz wyznaczania profili zmian gęstości i porowatości wzdłuż rdzenia.

Przeanalizowano obrazy CT piaskowców czerwonego spągowca i zaobserwowano związki między uśrednionymi dla rozpoznanych obiektów (porów) parametrami z analizy obrazu a parametrami zbiornikowymi.

Najwięcej istotnych korelacji, bo aż 16, zaobserwowano z współczynnikiem determinacji w zakresie $R^2 = 0,5$ do $R^2 = 0,59$. Współczynnik determinacji w zakresie $R^2 = 0,6$ do $R^2 = 0,69$ wykazało

11 związków, natomiast w zakresie $R^2 = 0,7$ do $R^2 = 0,79$ – 5 zależności między parametrami. Jedna zidentyfikowana korelacja charakteryzuje się współczynnikiem determinacji R^2 poniżej 0,5. Parametry objętości (*Volume*) i pola powierzchni (*Surface Area*) korelowały najliczniej z parametrami z innych metod badawczych. Po jednej korelacji zidentyfikowano przy średnicy ekwiwalentnej (*Equivalent Diameter*), spłaszczeniu (*Flatness*) i najdłuższej średnicy Fereta (*Feret Max*).

Za najbardziej istotne związki uznano zależności pomiędzy następującymi parametrami:

- objętościami z CT i polem powierzchni z CT a porowatościami wyznaczonymi z różnych metod pomiarowych;
- polem powierzchni z CT a logarytmem przepuszczalności absolutnej;
- charakterystyką Eulera z CT a porowatościami wyznaczonymi z różnych metod pomiarowych;
- najdłuższą średnicą Fereta z CT a zawartością wody zamkniętej w minerałach ilastych;
- współczynnikiem kształtu porów z zawartością wody zamkniętej w minerałach ilastych a współczynnikiem nasycenia wodą nieredukowalną.

Uzyskane modele matematyczne mogą znaleźć zastosowanie w estymacji parametrów petrofizycznych (porowatość, przepuszczalność) na podstawie obrazów tomograficznych tam, gdzie nie wykonano bezpośrednio pomiarów laboratoryjnych. Należy jednak pamiętać, że związki te wyznaczono dla piaskowców czerwonego spągowca facji eolicznej i nie mogą być one bezpośrednio przeniesione na inne typy litostratygraficzne.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Zaawansowana analiza tomograficznego obrazu struktury porowej skał* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0042/SW/2021, nr archiwalny: DK-4100-0030/2021.

Oprogramowanie poROSE wyznacza wiele parametrów charakteryzujących strukturę porową skał. Program poROSE jest jednym z produktów projektu pt. *Nowatorska metodyka interpretacji niekonwencjonalnych złóż ropy i gazu z wykorzystaniem wyników rentgenowskiej tomografii komputerowej*, realizowanego w latach 2016–2019 w ramach programu LIDER VI (umowa LIDER/319/L-6/14/NCBR/2015), finansowanego przez NCBiR. Jednym z celów napisania programu poROSE była możliwość wyznaczania konkretnych, użytecznych parametrów struktury porowej próbek skał, przydatnych w analizach petrofizycznych.

Literatura

Backeberg N.R., Iacoviello F., Rittner M., Mitchell T.M., Jones A.P., Day R., Wheeler J., Shearing P.R., Vermeesch P., Striolo A., 2017. Quantifying the anisotropy and tortuosity of permeable pathways in clay-rich mudstones using models based on X-ray tomography. *Science Reports*, 7: 14838. DOI: 10.1038/s41598-017-14810-1.

Cnudde V., Boone M., 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.

Dohnalik M., 2013. Zwiększanie możliwości wyznaczania parametrów zbiornikowych skał z wykorzystaniem rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. *Praca doktorska, Biblioteka Główna AGH, Kraków*.

Dohnalik M., Ziemiannin K., 2020. Charakterystyka utworów czerwonego spągowca w aspekcie badań rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej i mikroskopii optycznej. *Nafta-Gaz*, 11: 765–773. DOI: 10.18668/NG.2020.11.01.

Guo X., Shen Y., He S., 2015. Quantitative pore characterization and the relationship between pore distributions and organic matter in shale based on Nano-CT image analysis: A case study for a lacustrine shale reservoir in the Triassic Chang 7 member, Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 1630–1640. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.10.033.

Kaczmarek Ł., Kozłowska A., Maksimczuk 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/agp-2017-0010.

Karpyn Z.T., Alajmi A., Radaelli F., Halleck P.M., Grader A.S., 2009. X-ray CT and hydraulic evidence for a relationship between fracture conductivity and adjacent matrix porosity. *Engineering Geology*, 103: 139–145. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.06.017.

Kiersnowski H., 1997. Depositional development of the Polish Upper Rotliegend Basin and evolution of its sediment source areas. *Geological Quarterly*, 41(4): 433–456.

Kiersnowski H., Buniak A., 2006. Evolution of the Rotliegend Basin of northwestern Poland. *Geological Quarterly*, 50(1): 119–138.

Kiersnowski H., Buniak A., Kuberska M., Srokowska-Okońska A., 2010. Występowanie gazu ziemnego zamkniętego w piaskowcach czerwonego spągowca Polski. *Przegląd Geologiczny*, 58(4): 335–346.

Krakowska P., Dohnalik M., Jarzyna J., 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.

Krakowska P., Puskarczyk E., Jędrychowski M., Habrat M., Madejski P., Dohnalik M., 2018. Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166: 389–405. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.052.

Krakowska-Madejska P., Puskarczyk E., Habrat M., Madejski P., Dohnalik M., Jędrychowski M., 2021. Development of a Permeability Formula for Tight and Shale Gas Reservoirs Based on Advanced High-Precision Lab Measurement Techniques. *Energies*, 14(9): 2628. DOI: 10.3390/en14092628.

Lu X., Armstrong R.T., Mostaghimi P., 2018. High-pressure X-ray imaging to interpret coal permeability. *Fuel*, 226: 573–582. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.03.172.

Madejski P., Krakowska P., Habrat M., Puskarczyk E., Jędrychowski M., 2018. Comprehensive approach for porous materials analysis using a dedicated preprocessing tool for mass and heat transfer modeling. *Journal of Thermal Science*, 27: 479–486. DOI: 10.1007/s11630-018-1043-y.

Ohser J., Schladitz K., 2009. 3D images of material structures. *Wiley-VCH*.

poROSE, 2019. Pomoc programu poROSE.

Shiqi L., Sang S., Wang G., Ma J., Wang X., Wang W., Du Y., Wang T., 2017. FIB-SEM and X-ray CT characterization of interconnected pores in high-rank coal formed from regional metamorphism. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 148: 21–31. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.10.006.

Soulaine C., Gjetvaj F., Garin C., Roman S., Russian A., Gouze P., Tchelep H.A., 2016. The Impact of Sub-Resolution Porosity of X-ray Microtomography Images on the Permeability. *Transport of Porous Media*, 113: 227–243. DOI: 10.1007/s11242-016-0690-2.

Vásárhelyi L., Kónya Z., Kukovecz A., Vajtai R., 2020. Microcomputed tomography-based characterization of advanced materials: a review. *Materials Today Advances*, 8: 1–13. DOI: 10.1016/j.mtaadv.2020.100084.

Wang J., Zhao J., Zhang Y., Wang D., Li Y., Song Y., 2016. Analysis of the effect of particle size on permeability in hydrate-bearing porous media using pore network models combined with CT. *Fuel*, 163: 34–40. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.09.044.

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.



Mgr inż. Katarzyna DRABIK
Główny specjalista inżyniersko-techniczny
w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: katarzyna.drabik@inig.pl



Dr hab. inż. Edyta PUSKARCZYK
Adiunkt na Wydziale Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: puskar@agh.edu.pl



Dr hab. inż. Paulina KRAKOWSKA-MADEJSKA
Adiunkt na Wydziale Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: krakow@agh.edu.pl



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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

- badania tomograficzne skał:
 - » trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT),
 - » tomografia metrowych odcinków skał, profilowanie zmian parametrów petrofizycznych rdzenia (porowatość, gęstość objętościowa);
- badania metodą jądrowego rezonansu magnetycznego:
 - » określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek,
 - » generacja map T1-T2, szacowanie nasycenia wodą/węglowodorami,
 - » identyfikacja obecności substancji organicznej TOC;
 - » oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, ptuzkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej ptuzek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i ptuzkach wiertniczych;
- badanie przewodności cieplnej skał;
- wyznaczanie współczynnika przepuszczalności;
- badanie gęstości, gęstości właściwej i porowatości;
- interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej w zakresie określenia litologii i parametrów zbiornikowych skał oraz ocena stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach;
- badania serwisowe:
 - » pomiary składu chemicznego skał metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF wykonywane w celu oceny składu mineralnego oraz analiz chemostratygraficznych,
 - » spektrometryczne pomiary gamma na rdzeniu wiertniczym: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , total gamma przy wykorzystaniu mobilnego urządzenia „Gamma Logger”.



Kierownik: mgr inż. Rafał Skupio Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
Telefon: 12 650 64 84 Faks: 12 653 16 65 E-mail: skupio@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy