

Marek Dohnalik, Jadwiga Zalewska
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Badanie zależności pomiędzy właściwościami zbiornikowymi piaskowców czerwonego spągowca a wymiarem fraktalnym struktury porowej

Wstęp

Pojęcie fraktala wprowadził do nauki w latach siedemdziesiątych ub. wieku Benoît Mandelbrot, francuski matematyk polskiego pochodzenia [2]. Główną przyczyną powstania nowego określenia były prowadzone od przełomu XIX i XX wieku prace nad figurami samopodobnymi. Naukowcy także coraz częściej zaczęli dostrzegać, iż niemożliwe jest opisanie za pomocą geometrii euklidesowej kształtu takich obiektów jak chmura, drzewo czy linia brzegowa [9].

Ze względu na to, że kształty o charakterze fraktalnym często spotykane są w naturze, rachunek fraktalny ma również zastosowanie w naukach o Ziemi. Obszerny przegląd możliwości jego wykorzystania w tej dziedzinie znajduje się w monografii Turcotte'a [14]. W pozycji tej autor przedstawia możliwość zastosowania rachunku fraktalnego w badaniach geofizycznych i geologicznych, w tym m.in. w badaniu kształtu i rozkładu porów w skałach. Dwuwymiarowe przekroje gleby, która wykazała fraktalną naturę struktury porowej, badał Brakensiek z zespołem [1].

Wielu autorów sugeruje, iż struktura porowa skał piaskowcowych posiada fraktalny charakter [10]. Analizując kształt pustek skał piaskowcowych na cienkich płytkach (2D) czy na trójwymiarowych obrazach tomograficznych, można stwierdzić, iż są one na tyle nieregularne, że do ich opisu nie wystarczają pojęcia geometrii euklidesowej.

Jako jeden z pierwszych badania nad fraktalną naturą struktury porowej skał rozpoczął w latach 80 ub. wieku Thompson [13]. Hansen i Skjeltorp [5] metodą wymiaru pudełkowego badali płytki cienkie próbek piaskowca pochodzącego z Morza Północnego, uzyskując wymiar fraktalny $2,59 \div 2,73$. Szeroki zakres badań nad wykorzystaniem porozymetrii rてciowej w analizie natury fraktalnej przestrzeni porowej skał zbiornikowych opisuje w monografii Such [12].

Friesen i Mikula [4] badali za pomocą porozymetrii rてciowej próbki węgla, otrzymując dla nich wartość wymiaru fraktalnego z zakresu $2,6 < D_f < 3,0$.

Do określania wymiaru fraktalnego struktury porowej najczęściej stosowana jest jedna z trzech metod:

- analiza wymiaru pudełkowego na płytkach cienkich,
- analiza wymiaru fraktalnego na podstawie krzywych ciśnienia kapilarnych z porozymetrii rてciowej,
- analiza obrazu 3D – uzyskanie wymiaru pudełkowego dla poszczególnych przekrojów 2D lub analiza obrazów trójwymiarowych.

W tym artykule podjęty został problem badania zależności pomiędzy wartościami wymiaru pudełkowego, uzyskanego poprzez analizę trójwymiarowego obrazu struktury porowej skał, a właściwościami zbiornikowymi, określonymi na podstawie badań laboratoryjnych.

Metodyka

Materiał badawczy stanowiły 22 próbki reprezentujące piaskowce eoliczne facji rdzenia wydmy (A2), pochodzące z utworów czerwonego spągowca (tablica 1). Do badań

wybrano próbki z dwóch rejonów poszukiwawczych: Czarna Wieś–Parzęczewo oraz Siekierki–Kromolice–Miłosław, zlokalizowanych w częściach brzeżnych Ergu

Wschodniego [8]. Na obszarze Siekierki–Kromolice–Miłosław obserwuje się nieznaczną zmienność w wykształceniu petrograficznym piaskowców eolicznych oraz znaczne różnice we właściwościach zbiornikowych [3]. Ze względu na wyraźne zróżnicowanie parametrów zbiornikowych obszar Siekierki–Kromolice–Miłosław został podzielony na dwie strefy: pierwszą, o dobrych właściwościach zbiornikowych, do której można zaliczyć otwory Kromolice-1, Kromolice-2 oraz Środa Wielkopolska-6, z której wybrano 10 prób (8949–9234); drugą, o niskich właściwościach, gdzie zaliczono otwory Siekierki-3, Siekierki-4 oraz Miłosław-2 (Siekierki–Miłosław), z której wybrano 5 prób (12906–12917). Z rejonu

Czarna Wieś-5, 6 i 7 oraz Parzęczewo-1 i 2 wybrano 7 próbek (6330–7483).

Na próbkach przeprowadzono badania przepuszczalności oraz porowatości z wykorzystaniem metod:

- piknometrii helowej,
- porozymetrii rtęciowej,
- analizy obrazu uzyskanego z mikrotomografu komputerowego.

Następnie przeprowadzono analizę statystyczną wartości porowatości oraz przepuszczalności. Obrazy struktury porowej każdej próbki, uzyskane metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej, także poddano analizie ilościowej oraz obliczono wymiar fraktalny.

Wyniki

Próbki należące do poszczególnych rejonów znacznie różniły się pomiędzy sobą wartościami porowatości i przepuszczalności (tablica 1). Najlepszymi parametrami zbiornikowymi charakteryzowały się próbki z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice, gdzie średnia wartość porowatości z piknometru helowego wynosiła 14,6%, a przepuszczalności (z wykluczeniem próbki 9509) 4,9 mD. Dla rejonu Siekierki–Miłosław i Czarna Wieś–Parzęczewo właściwości te przyjmowały nieco niższe wartości, odpowiednio 11,7% i 0,44 mD oraz 9,47% i 0,61 mD.

Dla wartości porowatości obliczono średnią arytmetyczną, natomiast dla przepuszczalności – geometryczną, w celu zmniejszenia wpływu wartości skrajnych na wartość średnią. Dla obu parametrów obliczono także medianę. Wartość średnia i mediana dla porowatości obliczonych dla próbek z badanych rejonów nie różnią się zbyt wiele. Procentowo znacznie większe różnice pomiędzy wartością średnią a medianą otrzymano dla pomiarów przepuszczalności. Dla próbek z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice oraz Siekierki–Miłosław wartość średniej geometrycznej jest większa od mediany, natomiast w przypadku rejonu Czarna Wieś–Parzęczewo występuje tendencja odwrotna, co świadczy o tym, iż większość badanych próbek z tego rejonu ma przepuszczalność większą od wartości średniej.

Na uwagę zasługują znaczne różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi z porozymetrii rtęciowej i helowej dla dużej liczby próbek. Za pomocą piknometru helowego badano rdzenie walcowe o średnicy 25,4 mm, natomiast do pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej przeznaczono rdzenie (o średnicy 10 mm) wycięte z wcześniej przebadanej próbki o średnicy 25,4 mm. Występowanie różnic w wartościach porowatości otrzymanych z obydwu metod może świadczyć o nierównomierności w rozkładzie

porowatości w obrębie próbki lub wynikać z różnicy lepkości helu i rtęci.

Testowe badania przeprowadzone zostały na próbkach białego piaskowca szydlowieckiego, którego struktura porowa uważana jest za jednorodnie wykształconą. Stwierdzenie o jednorodnie wykształconej strukturze porowej jest poparte różnorodnymi badaniami parametrów petrofizycznych na próbkach. Pomiary te wykazały, iż różnice w lepkości obydwu płynów mają znikomą wpływ na otrzymaną wartość różnicy względnej. Dla dwóch przebadanych próbek otrzymano różnicę względną na poziomie 1%.

W kolumnie 6 omawianej tablicy 1 przedstawiono różnicę względną wyliczoną jako iloraz różnicy pomiędzy wartością porowatości z porozymetrii rtęciowej i helowej podzieloną przez wartość porowatości z porozymetrii rtęciowej. W przypadku gdy porowatość z porozymetrii rtęciowej jest większa od porowatości z porozymetrii helowej, wartość różnicy względnej ma znak dodatni; w przeciwnym przypadku przyjmuje wartości ujemne.

Próbki, dla których różnica względna nie przekraczała wartości $\pm 0,20$ zaznaczono kolorem zielonym, zakładając, że posiadają one jednorodny rozkład struktury porowej.

Podobną analizę homogeniczności rozkładu porowatości przeprowadzono na obrazach wewnętrznej struktury porów, uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. W tym celu wykorzystano moduł *Subfield Features* programu MAVI. Moduł ten pozwala zmierzyć tzw. porowatość lokalną. Metoda pomiaru polega na podzieleniu obrazu wejściowego na mniejsze sześciangi (podpróbki) i wyliczeniu dla każdego z nich współczynnika porowatości. Analizę porowatości lokalnej wejściowych obrazów o rozmiarach $900 \times 900 \times 400$ wykonano dla podpróbek o wymiarze 100^3 wokseli.

Tablica 1. Zestawienie wyników porowatości i przepuszczalności uzyskanych różnymi metodami

Numer próbki	Porowatość [%]			Przepuszczalność [mD]	$(K_{pHg} - K_{pHel})/K_{pHg}$	Odchylenie względne σ_{100}/K_{pCT}
	helowa	CT	Hg			
P. szydłowiecki					0,01	0,16
Środa Wielkopolska–Kromolice						
8949	9,70	12,50	14,30	2,65	0,32	0,25
9509	21,30	17,00	21,20	2,54	-0,01	0,12
9513	12,40	12,60	15,70	35,00	0,21	0,27
9523	13,70	10,10	15,90	3,40	0,14	0,40
9524	15,30	19,70	21,80	63,0	0,30	0,19
9228	13,70	11,80	15,40	0,39	0,11	0,29
9230	15,00	3,90	9,30	1,78	-0,61	0,33
9232	11,00	10,70	14,80	0,70	0,25	0,18
9233	17,20	16,60	20,60	8,69	0,17	0,27
9234	16,20	13,70	19,50	18,00	0,17	0,16
Śr. arytm.	14,55	12,86	16,85	14,85	–	–
Śr. geom.	14,22	11,96	16,39	4,86	–	–
Mediana	14,35	12,55	15,79	3,40	–	–
Siekierki–Miłosław						
12906	19,70	15,00	20,20	5,78	0,03	0,17
12913	8,90	5,30	10,60	0,12	0,16	0,21
12914	10,50	9,40	12,10	0,22	0,13	0,30
12915	10,10	5,00	10,80	0,12	0,06	0,20
12917	9,50	3,80	8,70	0,86	-0,09	0,26
Śr. arytm.	11,74	7,70	12,49	1,42	–	–
Śr. geom.	11,21	6,77	11,95	0,44	–	–
Mediana	10,11	5,30	10,77	0,22	–	–
Czarna Wieś–Parzęczewo						
6330	8,40	1,50	6,90	0,27	-0,22	0,67
6331	15,20	4,50	12,60	4,12	-0,21	0,73
6333	11,90	4,60	10,50	1,13	-0,13	0,36
6395	11,40	2,20	9,20	1,36	-0,24	0,41
7436	8,00	2,80	7,00	0,85	-0,14	0,43
7480	8,40	1,20	5,20	0,56	-0,61	1,42
7483	3,00	0,40	3,80	0,04	0,21	1,25
Śr. arytm.	9,47	2,46	7,89	1,19	–	–
Śr. geom.	8,60	1,91	7,35	0,61	–	–
Mediana	8,40	2,20	7,00	0,85	–	–

Jako kryterium jednorodności założono, mniej rygorystyczną, wartość względnego odchylenia standardowego na poziomie 0,3. Wartość ta została przyjęta po przeprowadzeniu kilku badań testowych na tych samych dwóch próbkach białego piaskowca szydłowieckiego. W przypadku tych próbek wartość względnego odchy-

lenia standardowego wyniosła 0,16 (tablica 1). Kolorem zielonym oznaczono wartości spełniające powyższe kryterium. Z całego zbioru próbek zdecydowanie wyróżniają się wszystkie próbki z rejonu Siekierki–Miłosław, które według obydwu metod charakteryzują się jednorodnością struktury porowej.

Klasyfikacja objętościowa porów

Klasyfikacja struktury przestrzeni porowej wydzielonej na obrazach 3D przeprowadzona została zgodnie ze standardową metodyką badań mikrotomograficznych realizowanych w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG [15]. Metodyka obejmuje analizę obrazów $500 \times 500 \times 400$ wokseli. W opisywanych badaniach, aby wynik był bardziej reprezentatywny (odnosił się do większej objętości), analizie poddano obrazy o rozmiarze $900 \times 900 \times 400$ wokseli. Ze względu na 3-krotne zwiększenie objętości analizowanego obrazu do klasyfikacji przestrzeni porowej wprowadzono VII klasę o objętości powyżej 1 000 000 wokseli. Tablica 2 przedstawia zastosowaną klasyfikację porów.

trzech próbek (8949, 9233 i 9523) klasa VII składa się z dwóch obiektów.

Analiza krętości geometrycznej kanałów porowych wykazała, iż większość badanych próbek (poza 9230, 8949 i 9523) posiadała połączenia we wszystkich trzech kierunkach (X, Y, Z). Dwie próbki (8949 i 9523) nie posiadały połączeń w kierunku osi X, a tylko w jednej próbce (9230) zaobserwowano brak ścieżek przepływu w którymkolwiek z kierunków. Średnia wartość krętości struktury porowej w analizowanym rejonie dla wszystkich zmierzonych kierunków wynosiła $1,24 \pm 0,08$.

W rejonie **Siekierki–Miłosław** budowa wewnętrznej

Tablica 2. Objętościowa klasyfikacja porów

Objętość pora [woksel]	1–9	10–99	100–999	1000–9999	10 000–99 999	100 000–1 000 000	>1 000 000
Objętość pora [μm^3]	$2 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$	$>2 \cdot 10^8$
Klasa	I	II	III	IV	V	VI	VII

W tablicy 3 zaprezentowano uzyskane wyniki, które wykazały znaczne zróżnicowanie budowy przestrzeni porowej skał. Wszystkie próbki z rejonu **Środa Wielkopolska–Kromolice** (z wyjątkiem 9230) posiadają dobrze rozbudowaną strukturę porową, co oznacza, iż w obrębie analizowanej próbki istnieją systemy połączonych porów i kanałków porowych, zajmujące jej znaczną część. W analizowanym zbiorze (poza 9230) w porowatości zdecydowanie dominuje VII klasa objętości. Dla sześciu próbek (9228, 9232, 9234, 9509, 9513 i 9524) klasę VII tworzy jeden system połączonych porów i kanałków, który zajmuje powyżej 9% objętości próbki. Dla pozostałych

sieci porów badanych próbek jest znacznie bardziej zróżnicowana pomiędzy poszczególnymi próbkami, niż miało to miejsce w poprzednio omawianym rejonie.

Klasa VII objętości występuje w trzech próbkach; jej udział zawiera się w szerokim przedziale (8÷96%). W próbce 12906, posiadającej najlepsze parametry z tego rejonu, VII klasa zajmuje 96% porowatości, natomiast w próbce 12917, o najmniejszym współczynniku porowatości, jest to 8%. Pozostałe dwie próbki posiadają słabo rozbudowaną strukturę porową; próbka 12915 posiada pory jedynie z klas I–V, a 12913 – pięć obiektów z klasy VI, stanowiących 5% objętości struktury porowej. Próbk

Tablica 3. Średnie wartości udziału poszczególnych klas objętości w strukturze porowej

Klasa objętości porów	Udział w porowatości [%]	Odchylenie standardowe	Udział w porowatości [%]	Odchylenie standardowe	Udział w porowatości [%]	Odchylenie standardowe
	Środa Wielkopolska–Kromolice		Siekierki–Miłosław		Czarna Wieś–Parzęczewo	
I	2,51	2,3	4,90	2,3	11,40	8,3
II	6,75	6,8	16,80	9,4	8,90	5,0
III	3,83	5,9	12,90	9,4	20,30	10,4
IV	4,01	7,6	18,30	15,3	29,80	10,0
V	2,18	5,1	11,80	11,4	15,50	10,5
VI	0,50	1,4	1,40	2,0	9,40	11,9
VII	80,19	28,8	33,90	44,2	5,40	12,5

12906 i 12914 posiadają połączenia kanałów porowych w trzech analizowanych kierunkach; próbka 12917 jedynie w kierunku osi Z. Średnia wartość krętości geometrycznej dla tego obszaru wynosi $1,30 \pm 0,64$.

Dla próbek 12913 i 12915 nie stwierdzono połączeń pomiędzy ich dwoma przeciwległymi bokami w żadnym z analizowanych kierunków, przy uzyskanej rozdzielczości pomiaru (6 μm).

Próbki z rejonu **Czarna Wieś–Parzęczewo** charakteryzują się najslabszymi parametrami uzyskanymi z analizy obrazu tomograficznego (tablica 3). Jedynie w dwóch próbkach (6331 i 6333) występują obiekty zaliczone do VII klasy objętości. W próbce 7480 występuje VI klasa objętości. W pozostałych próbkach sklasyfikowano pory w klasach I–V. Analiza krętości geometrycznej struktury porów wykazała połączone ścieżki przepływu jedynie w próbce 6331 dla kierunków X i Z, które zapewniła występująca w objętości próbki szczelina.

Analizując dane przedstawione w tablicy 1, można stwierdzić, że próbki pobrane z rejonu **Środa Wielkopolska–Kromolice** posiadają najlepsze właściwości zbiornikowe. Również wyniki zawarte w tablicy 3 potwierdzają, że te

próbki posiadają najlepiej rozbudowaną strukturę porową. Porównanie wartości współczynnika porowatości pomiędzy piknometrią helową a porozymetrią rtęciową wykazało, że połowa próbek (5) posiada jednorodnie rozmieszczoną strukturę porową. Analiza obrazu wykazała jednorodność porowatości dla 8 próbek.

Próbki pobrane z rejonu **Siekierki–Miłosław** posiadają znacznie słabsze właściwości zbiornikowe (tablica 1). Również z danych uzyskanych z analizy obrazu mikrotomografii rentgenowskiej wynika, iż struktura porowa tych próbek jest słabo rozbudowana. Natomiast bardzo ciekawą cechą tych próbek jest spełnienie kryterium jednorodności rozkładu struktury porowej według obydwu przyjętych założeń.

Zbiór próbek z ostatniego analizowanego rejonu, **Czarna Wieś–Parzęczewo**, posiada najniższą średnią wartość współczynników porowatości oraz przepuszczalności. Z danych otrzymanych z analizy obrazu wynika, że próbki te mają najslabiej rozbudowaną strukturę porową. Badania wykazały także dużą niejednorodność rozkładu porowatości, równocześnie dostarczając informacji o anizotropii w rozkładzie przestrzeni porowej.

Analiza wymiaru pudełkowego na trójwymiarowych obrazach struktury porowej

W celu wyliczenia wymiaru pudełkowego zastosowano moduł *FractalCount (3D)* w oprogramowaniu ImageJ [6], który został opracowany przez Pera Christiana Hendena i Jensa Bachege-Wiiga [7]. W tablicy 4 przedstawiono wy-

niki otrzymanych wartości wymiaru pudełkowego trójwymiarowych obrazów struktury porowej. Analizie poddane zostały obrazy o wymiarze $900 \times 900 \times 400$ wokseli.

Najwyższą średnią wartość wymiaru pudełkowego uzyskano dla próbek pochodzących z rejonu Siekierki–Miłosław; wartości te zawierają się w przedziale $2,78 \div 2,90$. Podobną wartość średnią uzyskano dla próbek z obszaru Środa Wielkopolska–Kromolice; zakres zmian wartości był taki sam jak dla poprzedniego rejonu. Uzyskane wyniki nie pozwalają na wyznaczenie jednoznacznej zależności pomiędzy wartościami wymiaru pudełkowego a właściwościami zbiornikowymi. Z danych wynika, że wysoką wartość wymiaru pudełkowego posiadają zarówno próbki o podwyższonej porowatości [11], jak i próbki o średniej porowatości rozmieszczonej w sposób jednorodny, czyli w sensie fraktalnym samopodobnie. Najniższe wartości wymiaru pudełkowego otrzymano dla próbek z obszaru Czarnej Wsi i Parzęczewa. Zależność

Tablica 4. Wartości wymiaru fraktalnego uzyskane z analizy trójwymiarowych obrazów

Rejon	Numer próbki	Wymiar fraktalny	Rejon	Numer próbki	Wymiar fraktalny
Środa Wielkopolska–Kromolice	8949	2,88	Siekierki–Miłosław	12906	2,87
	9509	2,82		12913	2,87
	9513	2,85		12914	2,90
	9523	2,87		12915	2,86
	9524	2,89		12917	2,78
	9228	2,84		Średnia	2,86
	9230	2,78	Czarna Wieś–Parzęczewo	6330	2,65
	9232	2,89		6331	2,66
	9233	2,90		6333	2,73
	9234	2,81		6395	2,72
Średnia	2,85	7436		2,72	
			7480	2,55	
			7483	2,47	
			Średnia	2,64	

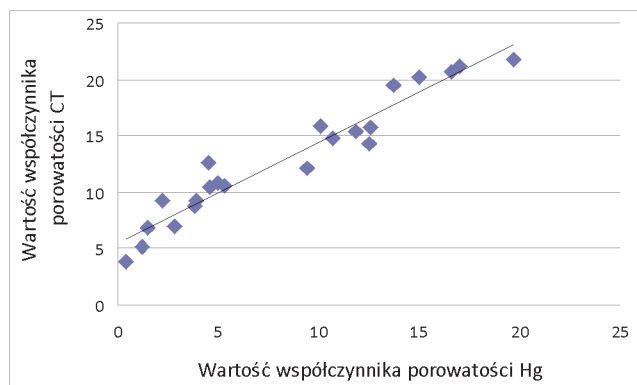
ta potwierdza tezę, że wartość wymiaru świadczy o tym, czy analizowana struktura porowa jest dobrze rozwinięta.

Analizując cały zbiór próbek można stwierdzić, że struktura porowa o niższej wartości wymiaru pudełkowego jest słabiej rozbudowana. Próbki z rejonu Czarna Wieś–Parzęczewo według danych zawartych w tabelicy 3 posiadają najniższy udział VII klasy w objętości porów. Natomiast próbki o wyższych wartościach wymiaru pudełkowego posiadają w strukturze porowej znacznie większy udział połączonych systemów porów w swojej objętości.

Głównym celem przeprowadzonych badań była analiza zależności pomiędzy wartościami wymiaru pudełkowego struktury porowej piaskowców eolicznych czerwonego spągowca facji rdzenia wydmy a właściwościami zbiornikowymi tych skał. Badane próbki pochodziły z 3 rejonów poszukiwawczych, różniących się pomiędzy sobą procesami diagenetycznymi oraz właściwościami zbiornikowymi. Dodatkowo przeprowadzono także analizę jednorodności rozkładu struktury porowej próbek.

Dla zbioru wszystkich próbek (22) otrzymano wysoki współczynnik korelacji pomiędzy wartościami współczynnika porowatości uzyskanymi metodą porozymetrii rtęciowej oraz porowatości wyliczonej z analizy obrazu (rysunek 1). Należy jeszcze raz podkreślić, że analiza obrazów uzyskanych w omawianych badaniach uwzględnia jedynie pory o rozmiarze powyżej 6 μm .

Dla całej kolekcji próbek określono relację pomiędzy wymiarem pudełkowym i wartością porowatości z po-



Rys. 1. Zależność pomiędzy wartościami porowatości uzyskanymi dwiema metodami (współczynnik korelacji 0,97)

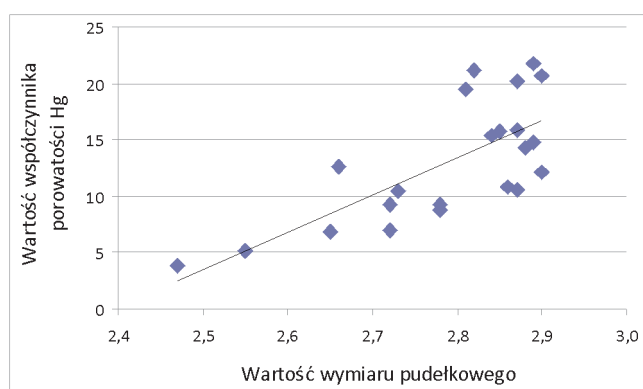
rozymetru rtęciowego. Dobrą zależność otrzymano także dla wartości odchylenia standardowego względnego porowatości lokalnej (tabela 1) uzyskanej z analizy obrazu, obliczanej dla jego 324 segmentów.

Zależność z wykresu na rysunku 2a wskazuje, że struktura porowa próbek o niskim współczynniku porowatości całkowitej posiada mniejszą wartość wymiaru pudełkowego.

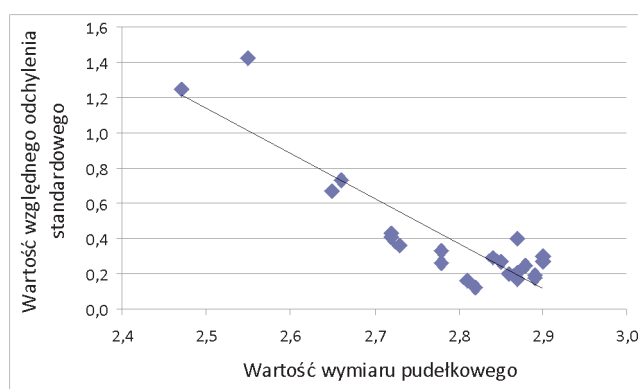
Wyniki przedstawione na rysunku 2b świadczą, iż wraz ze wzrostem jednorodności dystrybucji przestrzeni porowej rośnie wartość wymiaru pudełkowego.

W następnej kolejności przeprowadzono analizę zależności pomiędzy wynikami uzyskanymi dla próbek z poszczególnych rejonów.

a)



b)



Rys. 2. Zależność wartości wymiaru pudełkowego od porowatości z porozymetru rtęciowego (współczynnik korelacji 0,72) oraz od wartości względnego odchylenia standardowego porowatości lokalnej (współczynnik korelacji 0,89)

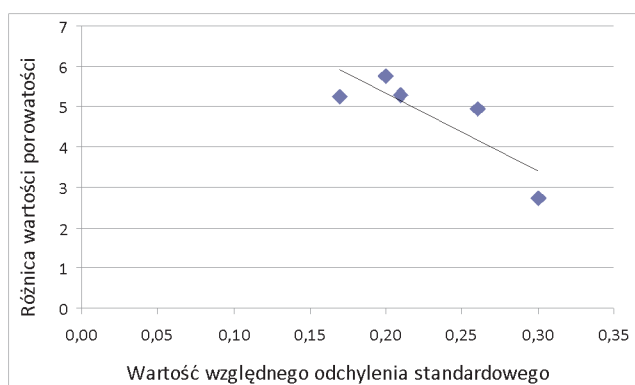
Rejon Siekierki–Miłosław

Dla tego rejonu dysponowano zaledwie pięcioma próbkami, stąd uzyskane zależności nie są w pełni reprezentatywne. Na podstawie analizy porowatości lokalnej

stwierdzono, że próbki te posiadają jednorodną dystrybucję porów (tabela 1).

Dla tych próbek istnieje korelacja pomiędzy wartością

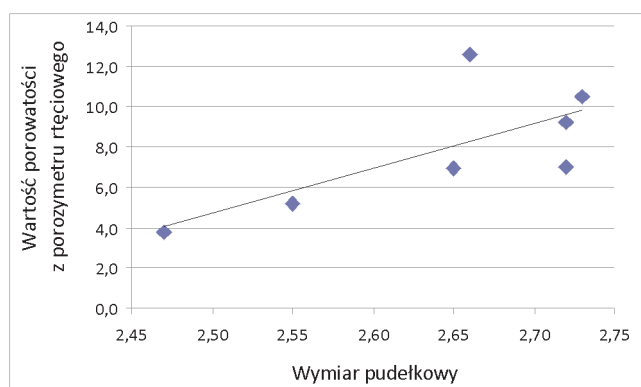
względnego odchylenia standardowego a różnicą w wartościach porowatości z porozymetrii rtęciowej oraz uzyskanej z analizy obrazu (rysunek 3). Z zależności tej wynika, że udział mikroporów w próbkach o stosunkowo jednorodnej budowie ma znaczny wpływ na regularność rozmieszczenia makroporów w przestrzeni próbki.



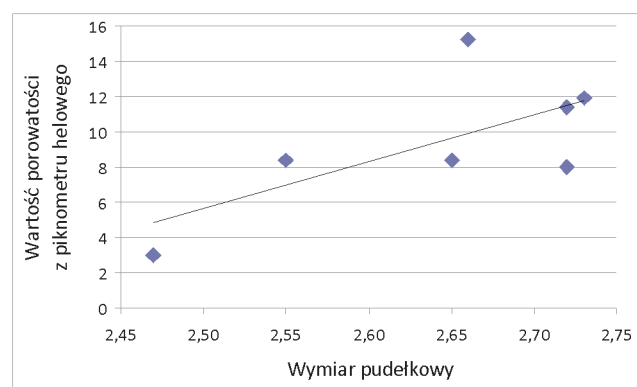
Rys. 3. Zależność wartości względnego odchylenia standardowego od różnicy współczynników porowatości

Rejon Czarna Wieś–Parzęczewo

a)



b)



Rys. 4. Zależność pomiędzy wartościami wymiaru pudełkowego a współczynnikami porowatości z porozymetru rtęciowego (a – współczynnik korelacji 0,71) oraz piknometru helowego (b – współczynnik korelacji 0,68)

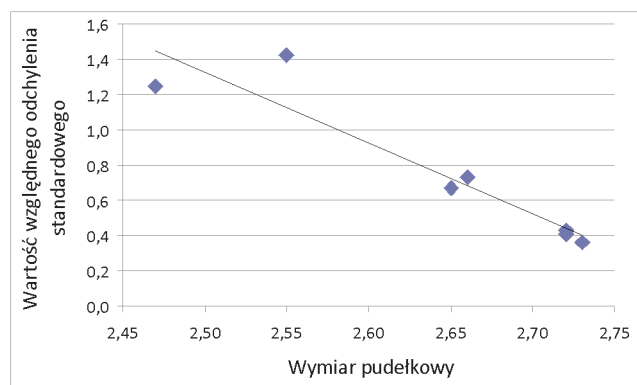
W rejonie Czarna Wieś–Parzęczewo obserwuje się znacznie większe zróżnicowanie wartości wymiaru pudełkowego. Takie dane pozwoliły wyznaczyć dla próbek z tego rejonu zależności korelacyjne między porowatością z piknometru helowego i porozymetru rtęciowego a wymiarem pudełkowym na poziomie 0,7 (rysunek 4a i 4b). Wartości wymiaru pudełkowego dobrze korelują także z wartościami względnego odchylenia standardowego (rysunek 5), co potwierdza, że wraz ze wzrostem wartości wymiaru pudełkowego rośnie jednorodność dystrybucji struktury porowej.

Bardzo małe zróżnicowanie wartości wymiaru pudełkowego dla próbek z rejonów Siekierki–Miłosław i Środa Wielkopolska–Kromolice nie pozwoliło wyznaczyć zależności z pomierzonymi właściwościami zbiornikowymi skał.

Wyniki otrzymane podczas realizacji pracy niestety nie dają jednoznacznej informacji o istnieniu związku pomiędzy wartościami wymiaru pudełkowego a innymi właściwościami zbiornikowymi piaskowców czerwonego spągowca.

Uzyskane średnie wartości wymiaru pudełkowego obrazów CT wykazały pewne zróżnicowanie ze względu na własności zbiornikowe próbek z całego badanego zbioru.

Wyraźnie najmniejsze wartości wymiaru pudełkowego uzyskano dla próbek pochodzących z rejonu Czarna Wieś–Parzęczewo, o najsłabszych parametrach zbiornikowych (tablica 1). Zastanawiający jest jednak fakt, iż zbliżone do siebie wartości wymiaru pudełkowego uzyskano dla próbek z rejonów Środa Wielkopolska–Kromolice i Sie-



Rys. 5. Zależność pomiędzy wartościami wymiaru pudełkowego i wartościami względnego odchylenia standardowego porowatości lokalnej (współczynnik korelacji 0,94)

kierki–Miłosław, pomimo zdecydowanie różnych wartości współczynników przepuszczalności i porowatości. Taki wynik wskazuje, że wymiar pudełkowy zależy nie tylko od własności zbiornikowych.

Przeprowadzona analiza obrazu wykazała wysoką jednorodność struktury porowej próbek piaskowców pocho-

dzących z rejonu Siekierki–Miłosław (tablica 1). Także połowa próbek z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice wykazała jednorodność. Pozostałe próbki charakteryzowały się dużą niejednorodnością dystrybucji porów. Szczególnie pod tym względem wyróżniają się próbki z rejonu Czarna Wieś–Parzęczewo.

Wnioski

Analiza wymiaru pudełkowego nie daje jednoznacznych powiązań z innymi parametrami charakteryzującymi właściwości zbiornikowe skał. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że próbki, których struktura porowa posiada niską wartość wymiaru pudełkowego posiadają niski współczynnik porowatości całkowitej. Natomiast w przypadku próbek o wysokiej wartości wymiaru pudełkowego można wnioskować, iż posiadają one wysoki współczynnik porowatości albo jednorodny rozkład struktury porowej.

Wartości wymiaru pudełkowego rosną wraz ze wzrostem jednorodności struktury porowej w obrębie próbki.

Wykonanie badań wymiaru fraktalnego dla większej liczby próbek pozwoli na mocniejsze określenie trendów lub stwierdzenie ich braku. Warto także uzupełnić badania o wartości współczynnika porowatości efektywnej uzyskanej na podstawie rozkładu czasu relaksacji poprzecznej metodą jądrowego rezonansu magnetycznego oraz o opis petrograficzny szlifów.

Artykuł zawiera wyniki badań prowadzonych w 2011 roku podczas realizacji pracy statutowej finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, nr arch. INiG DK-4100-11/11, kierownik pracy – mgr inż. Marek Dohnalik.

Literatura

- [1] Brakensiek D.L., Rawls W.J., Logsdon S.D., Edwards W.M.: *Fractal description of macroporosity*. „Soil Science Society of America Journal” 1992, vol. 56, s. 1721–1723.
- [2] Britannica, Mandelbrot, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/361663/Benoit-Mandelbrot>, dostęp: marzec 2011 r.
- [3] Buniak A., Kuberska M., Kiersnowski H.: *Petrograficzno-petrofizyczna charakterystyka piaskowców eolicznych strefy Siekierki-Winna Góra (koło Poznania) w aspekcie poszukiwań złóż gazu zamkniętego w osadach czerwonego spągowca*. „Przegląd Geologiczny” 2009, t. 57, nr 4, s. 328–334.
- [4] Friesen W.I., Mikula R.J.: *Fractal dimensions of coal particles*. „Journal of Colloid and Interface Science” 1987, vol. 120, s. 263–271.
- [5] Hansen J.P., Skjeltorp A.T.: *Fractal pore space and rock permeability implications*. „Physical Review B” 1988, vol. 38, s. 2635–2638.
- [6] <http://rsbweb.nih.gov/ij/>, dostęp: kwiecień 2011 r.
- [7] <http://www.pvv.org/~perchrh/imagej/fractal.html>, dostęp: czerwiec 2011 r.
- [8] Kiersnowski H.: *Depositional development of the Polish Upper Rotliegend Basin and evolution of its sediment source areas*. „Geological Quarterly” 1997, vol. 41, no. 4, s. 433–456.
- [9] Mandelbrot B.: *The fractal geometry of nature*. New York, W.H. Freeman and Company, 1983, s. 1–468.
- [10] Pape H., Clauser C., Iffland J.: *Permeability prediction based on fractal pore-space geometry*. „Geophysics” 1999, vol. 64, no. 5, s. 1447–1460.
- [11] Plewa S., Plewa M.: *Petrofizyka*. Wydawnictwa Geologiczne, 1992, s. 41, 51–52.
- [12] Such P.: *Zastosowanie rachunku fraktalowego w badaniach przestrzeni porowej skał zbiornikowych*. Prace IGNiG 2002, nr 115, s. 1–28.
- [13] Thompson A.H.: *Fractals in rock physics*. „Annual Review of Earth and Planetary Sciences” 1991, vol. 19, s. 237–262.
- [14] Turcotte D.L.: *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University press, 1997, s. 1–398.
- [15] Zalewska J., Poszytek A., Dohnalik M.: *Wizualizacja i analiza przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (micro-CT)*. Prace INiG 2009, nr 161, s. 1–83.



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.



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych. Autorka 132 publikacji.