

Marek Dohnalik, Jadwiga Zalewska

*Institut Nafty i Gazu, Kraków*

## Korelacja wyników badań laboratoryjnych uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii, jądrowego rezonansu magnetycznego i porozymetrii rtęciowej

Celem przeprowadzonych badań było porównanie informacji uzyskanych z pomiarów następującymi metodami: porozymetrii rtęciowej, jądrowego rezonansu magnetycznego i rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Przebadane zostały próbki piaskowca czerwonego spągowca facji eolicznej rdzenia wydmy. W badaniach wykorzystano dwa nowe parametry otrzymane z analizy obrazu przestrzennego odwzorowującego strukturę porową próbek skał, tj.: charakterystykę Eulera i średnią długość cięciwy, które zostały obliczone w programie MAVI. Następnie skorelowano je z parametrami otrzymanymi z pozostałych metod.

Słowa kluczowe: rentgenowska mikrotomografia komputerowa, jądrowy rezonans magnetyczny, porozymetria rtęciowa, długość średniej cięciwy, charakterystyka Eulera, analiza obrazu.

### Correlation of results of laboratory tests obtained by X-ray microtomography, nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry

The aim of the study was to compare the information obtained from mercury porosimetry, nuclear magnetic resonance and X-ray computed microtomography methods. The samples tested were from Rotliegend sandstone of aeolian core dunes deposits. In this paper two new parameters obtained from pore structure spatial image analysis were used: Euler number and mean chord length calculated with the use of MAVI software. These parameters were correlated with the parameters obtained with other methods.

Key words: roentgen computed microtomography, nuclear magnetic resonance, mercury porosimetry, Euler characteristic, mean chord length, image analysis.

#### Wstęp

Badania dotyczące struktury porowej są niezbędne w celu określenia właściwości zbiornikowych skał. Od kilkudziesięciu lat wciąż wprowadzane są nowe i coraz bardziej precyzyjne metody badania współczynnika porowatości skał [3, 11]. Każda z metod posiada pewne ograniczenia dotyczące rozmiaru próbki i oparta jest na innych zjawiskach fizycznych, na podstawie których uzyskuje się informację dotyczącą struktury porowej. Dlatego rozsądnym podejściem wydaje się być wykorzystywanie kilku metod

badających przestrzeń porową, aby uzyskać jak najbardziej obszerny jej opis.

W literaturze międzynarodowej można odnaleźć wiele przykładów opisujących wykorzystanie komplementarnych badań w celu dokładniejszego opisu struktury porowej bądź też korelacji uzyskanych wyników. Verges i in. [8] opisują symulację zatłaczania rtęci podczas badania porozymetrycznego i odnoszą uzyskane wyniki do rzeczywistych danych. Do celów symulacji wykorzystują wydzielony obraz struktury

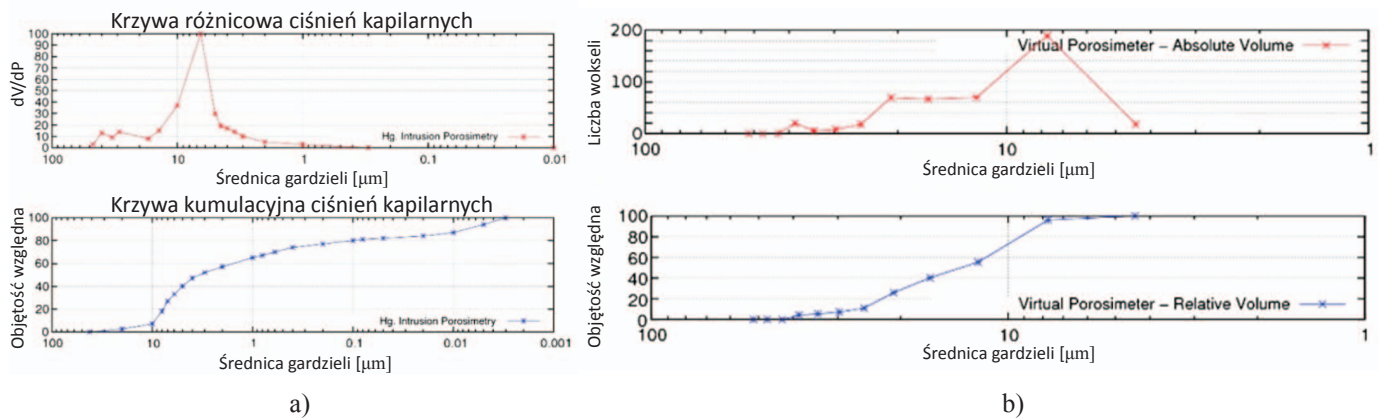
porowej, otrzymany metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (micro-CT). Opisywane badania wykonane zostały na próbkach reprezentujących utwory piaskowcowe. Dla obydwu metod (micro-CT i porozymetrii rtęciowej) otrzymano zbliżone wartości współczynnika porowatości całkowitej. Autorzy także dokonali porównania krzywych (kumulacyjnej i różnicowej) ciśnień kapilarnych dla wartości rzeczywistych i obliczonych. W tym przypadku uzyskano już mniejszy stopień zgodności. Na rysunku 1 zaprezentowano uzyskane wyniki: rysunek 1a przedstawia dane rzeczywiste, natomiast 1b – dane obliczone. Główne różnice wynikają z mniejszej ilości punktów charakterystycznych na krzywej uzyskanej z symulacji oraz braku informacji dla średnicy poniżej 4 μm, spowodowanej ograniczoną rozdzielczością pomiaru micro-CT. Zgodną cechą obydwu metod jest uzyskanie maksimum krzywych różnicowych, dla tego samego rozmiaru gardzieli.

budowlanych i lepiej połączoną strukturę porową w porównaniu do próbek kamienia cementowego.

Dla metod porozymetrii rtęciowej i mikrotomografii autorzy pracy porównali wartości współczynnika porowatości dla tego samego zakresu badawczego średnic pustek. W tabelicy 1 przedstawiono uzyskane wartości dla pokrywającego się zakresu (10÷60 μm).

Różnica pomiędzy wartościami porowatości w tym samym zakresie średnic porów wynika z efektu niedoszacowania porów o dużej średnicy (tzw. *ink bottle effect*) przez metodę porozymetrii rtęciowej [5]. Otrzymanie dla tego samego zakresu średnic pustek niższych wartości współczynnika porowatości dla metody porozymetrii rtęciowej wskazuje na to, że znaczna część struktury porowej badanych próbek jest połączona gardzielami o średnicy mniejszej niż 10 μm.

Autorzy zwracają uwagę na fakt, że ze względu na różne podstawy pomiaru zastosowanych metod, dają one cenne



Rys. 1. Porównanie krzywych kumulacyjnych oraz różnicowych dla wartości obliczonych i zmierzonych [8]

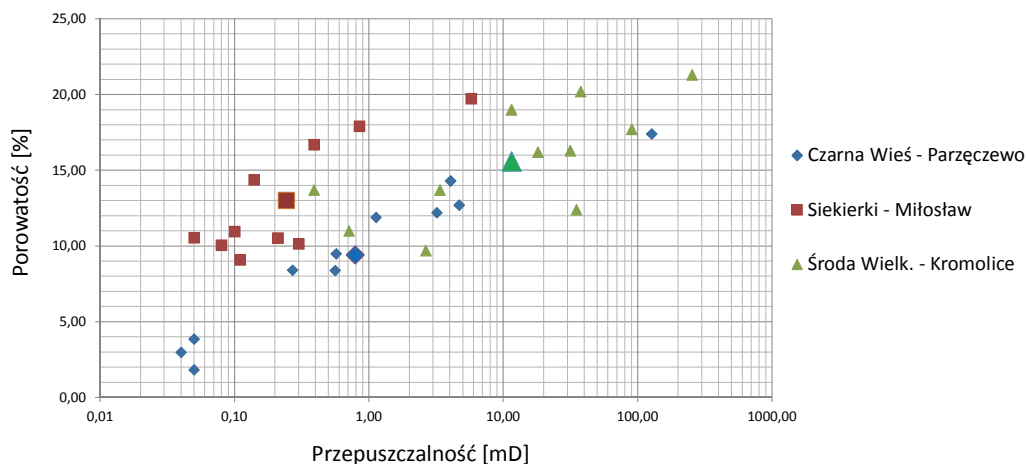
Kolejna publikacja porównuje wyniki otrzymane metodami porozymetrii rtęciowej (MIP) i mikrotomografii. W omawianym artykule [2] badano naturalne kamienie budowlane oraz kamienie cementowe. Uzyskane wyniki współczynnika porowatości całkowitej wykazały wyższe wartości dla metody porozymetrii rtęciowej. Główną przyczyną rozbieżności otrzymanych wartości jest różny zakres rozmiaru badanych porów przy poszczególnych metodach. Autorzy podają, że metodą porozymetrii rtęciowej byli w stanie spenetrować przestrzeń porową od średnicy gardzieli 0,01 μm, a techniką mikrotomografii – od 10 μm. Znacznie większe rozbieżności wyników otrzymano dla kamieni cementowych niż dla naturalnych kamieni budowlanych. Autorzy tłumaczą ten fakt różnicą w budowie próbek, zwracając uwagę na większe ziarna w materiałach

i uzupełniające się informacje odnośnie budowy struktury porowej badanych próbek, podkreślając tym samym ważność prowadzenia tego typu badań.

Tablica 1. Wartości współczynników porowatości uzyskanych różnymi metodami [2]

Nr próbki	Porowatość MIP [%]	Porowatość CT [%]
25 cement	0,62	3,57
35 cement	0,62	3,16
42 cement	0,66	1,80
B38	7,47	6,36
B111	19,65	18,45
M49	35,50	42,14





Rys. 3. Zestawienie wartości współczynnika przepuszczalności i porowatości całkowitej określonej z piknometru helowego dla próbek z trzech badanych rejonów

### Metodyka badań

W niniejszym artykule wykorzystano cztery, z dostępnych w INiG w Krakowie, metody pomiaru współczynnika porowatości:

- piknometrię helową,
- jądrowy rezonans magnetyczny,
- porozymetrię rtęciową,
- rentgenowską mikrotomografię komputerową.

W porównaniu z poprzednimi badaniami [10] w omawianej pracy rozszerzono metodykę analizy obrazu struktury porowej o następujące parametry, obliczone z użyciem oprogramowania MAVI [MAVI 1.4.0 documentation]:

- charakterystykę Eulera,
- średnią długość cięciwy.

Hans Jorg Vogel w artykule z 2002 roku [9] zwraca uwagę na związek charakterystyki Eulera z właściwościami analizowanej struktury. W swoim artykule opisuje on badania na przykładzie próbki gleby i rozważa występujące w niej bardzo nieregularne kształty (szczeliny, rozprzestrzenianie się korzeni czy kanały wytworzone przez robaki). Autor zaznacza, iż bardzo ważnym parametrem oceny struktury porowej jest charakterystyka Eulera (ang. *Euler number*) [6]. Podkreśla, że sposób, w jaki pory są połączone, może mieć większy wpływ na właściwości struktury niż ich liczba czy rozmiar.

Charakterystyka Eulera może być określona wzorem:

$$\chi = N - C + H \quad (1)$$

gdzie:

$N$  – liczba izolowanych obiektów (warstwa obrazu odwzorowująca strukturę porową),

$C$  – ilość połączeń (warstwa obrazu odwzorowująca strukturę porową),

$H$  – liczba całkowicie izolowanych ziaren skały.

Wartość współczynnika  $H$  dla obrazów skał nie jest istotna, gdyż w naturze nie spotyka się cząstek szkieletu skalnego całkowicie otoczonych powietrzem.

Dla powyższych założeń wartość charakterystyki Eulera może być traktowana jako miara połączeń struktury porowej. Wartości dodatnie tej charakterystyki ( $N > C$ ) oznaczają, że struktura porowa jest słabo połączona, w przypadku przeciwnym ( $C > N$ ) struktura porowa posiada wiele połączeń pomiędzy porami. Szczegółowy opis, w jaki sposób wartość charakterystyki Eulera jest obliczana na przestrzennym obrazie, można znaleźć w publikacji J. Toriwaki i T. Yonekura [7].

W tabelicy 2 przedstawiono otrzymane wartości charakterystyki Eulera dla kilku przypadków badanego obrazu. Analizie został poddany obraz o rozmiarze  $200 \times 200 \times 200$  wokseli, o wyliczonej porowatości 22%. W pierwszej kolumnie przedstawiono zakres objętości podsystemów porów obecnych na analizowanym obrazie. W kolumnie drugiej podano otrzymaną wartość charakterystyki Eulera dla badanego przypadku, a w kolumnie trzeciej – ilość obiektów znajdujących się w obrębie analizowanego obszaru.

Powyższe porównanie wykazało wyraźną korelację pomiędzy liczbą izolowanych obiektów w przestrzeni porowej a wartością charakterystyki Eulera. Widoczny jest wzrost wartości tego parametru pomiędzy obiektami o objętości 10 i 100 wokseli, następnie wartość charakterystyki Eulera maleje, gdyż w analizowanym obszarze pojawiają się rozbudowane i połączone systemy porów. Bardzo istotna jest zmiana wartości badanego parametru otrzymanego w przypadku, gdy na obrazie znajdują się podsystemy porów o objętości do 10 000 wokseli oraz gdy brane są pod uwagę wszystkie obiekty obrazu. Na analizowanym

Tablica 2. Wartości charakterystyki Eulera w zależności od objętości badanego podsystemu porów

Objętość analizowanych porów [woksel*]	Wartość charakterystyki Eulera	Ilość obiektów
do 10	3425	3562
do 100	6015	6439
do 1000	5969	6467
do 10 000	5962	6468
Wszystkie	<b>-5903</b>	6469
powyżej 10	-8944	3306
powyżej 100	-11 916	32
powyżej 1000	-11 872	2
powyżej 10 000	-11 865	1

\*woksel – 216  $\mu\text{m}^3$

obrazie przybywa jeden obiekt, a wartość parametru zmienia się z 5962 na – 5903. Spowodowane jest to tym, że jeden podsystem porów jest bardzo dobrze rozbudowany

i zajmuje ok. 70% porowatości próbki. Przeciwny trend jest obserwowany w przypadku, gdy z całego obrazu stopniowo odedjmowane są izolowane obiekty. Wartość charakterystyki Eulera maleje od –5903 do –11 916. Następnie zaczyna ona nieznacznie rosnąć, gdyż usuwane są dobrze połączone podsystemy porów, osiągając wartość –11 865 dla jednego bardzo dobrze rozbudowanego systemu porów.

Jako kolejny ważny parametr uznano średnią długość cięciw (ang. *mean chord length*). Współczynnik ten określa średnią długość z cięciw poprowadzonych przez analizowany obraz i przecinających warstwę reprezentującą strukturę porową badanej próbki.

Tablica 3 ilustruje zmianę wartości średniej długości cięciw dla badanej próbki w zależności od zakresu objętości badanych podsystemów porów. W drugiej i czwartej kolumnie tej tabeli przedstawiono długości parametru w zakresie poszczególnych klas objętości, natomiast w pierwszej i trzeciej – zakres objętości analizowanych podsystemów porów. Zauważalny jest wyraźny wzrost długości średniej cięciwy wraz ze wzrostem objętości analizowanych podsystemów porów.

Tablica 3. Długość średniej cięciwy w zależności od objętości badanego podsystemu porów

Zakres objętości analizowanych porów [woksel]	Długość średniej cięciwy [woksel]	Zakres objętości analizowanych porów [woksel]	Długość średniej cięciwy [woksel]
< 10	1,8	< 10	1,8
10÷100	2,1	< 100	2,0
100÷1000	3,2	< 1000	2,3
1000÷10 000	4,6	< 10 000	2,3
10 000 <	5,3	< 100 000	5,0

## Wyniki badań

Przeprowadzone badania potwierdziły występowanie znacznych różnic w budowie struktury porowej pomiędzy próbkami z poszczególnych rejonów. Tablica 4 przedstawia średnie wartości udziału poszczególnych klas objętości w strukturze porowej próbek pobranych z badanych otworów. Opis metody klasyfikacji można znaleźć w ogólnodostępnym opracowaniu autorstwa J. Zalewskiej i in. [10].

Największe wartości udziału VII klasy, świadczące o bardzo dobrze połączonej strukturze porowej, uzyskano dla próbek z rejonu Środa Wielkopolska – Kromolice, kolejno dla stref: Siekierki – Miłosław i Czarna Wieś – Parzęczewo.

Badania wykonane porozymetrem rtęciowym oraz metodą jądrowego rezonansu magnetycznego wykazały także znaczne zróżnicowanie wartości pomiędzy próbkami z badanych rejonów (tablica 5).

Powyższe wyniki pokazują podobny trend wzrostu war-

tości średnich do tego, jaki miał miejsce dla danych otrzymanych z wyników pochodzących z analizy obrazu (tablica 4). Wartości współczynników porowatości określone różnymi metodami są najmniejsze dla próbek pochodzących z rejonu Czarna Wieś – Parzęczewo, a największe dla wybranych z rejonu Środa Wielkopolska – Kromolice. Zastanawiająca jest jednak średnia wartość współczynnika przepuszczalności otrzymana dla próbek z rejonu Czarna Wieś – Parzęczewo. Pomimo znacznie niższych wartości współczynnika porowatości efektywnej z metody NMR oraz efektywnej z porozymetrii rtęciowej i piknometrii helowej próbki te posiadają wyższy współczynnik przepuszczalności.

W tablicach 6, 7 i 8 zaprezentowano wyniki parametrów uzyskanych za pomocą zastosowanych metod. Następnie przedstawione zostały korelacje pomiędzy wybranymi parametrami.

Tablica 5. Wartości parametrów uzyskane z badań laboratoryjnych

Parametr	Czarna Wieś – Parzęczewo		Stiekierki – Miłosław		Środa Wlkp. – Kromolice	
	wartość średnia [%]	odchylenie standardowe [%]	wartość średnia [%]	odchylenie standardowe [%]	wartość średnia [%]	odchylenie standardowe [%]
Współczynnik porównalności efektywnej NMR	<b>5,51</b>	3,3	<b>9,35</b>	3,17	<b>14,66</b>	<b>2,71</b>
Współczynnik zawartości wody nieredukowalnej NMR	<b>51,68</b>	22,2	<b>25,07</b>	5,73	<b>15,48</b>	<b>3,94</b>
Współczynnik porównalności Hg	<b>7,30</b>	3,2	<b>12,96</b>	4,25	<b>17,67</b>	<b>2,74</b>
Współczynnik porównalności He	<b>9,41</b>	4,9	<b>13,01</b>	3,85	<b>15,56</b>	<b>3,79</b>
Przepuszczalność Średnia geometryczna [mD]	<b>0,79</b>		<b>0,24</b>		<b>11,55</b>	

Tablica 4. Wartości udziału klas objętości dla próbek z poszczególnych rejonów

Klasa objętości	Czarna Wieś – Parzęczewo		Stiekierki – Miłosław		Środa Wlkp. – Kromolice	
	wartość średnia [%]	odchylenie standardowe [%]	wartość średnia [%]	odchylenie standardowe [%]	wartość średnia [%]	odchylenie standardowe [%]
I	<b>14,86</b>	15,9	<b>4,61</b>	2,63	<b>1,70</b>	0,72
II	<b>17,22</b>	14,5	<b>15,91</b>	9,88	<b>4,39</b>	1,97
III	<b>17,74</b>	12,3	<b>10,13</b>	7,53	<b>1,83</b>	1,75
IV	<b>20,91</b>	12,8	<b>16,10</b>	14,21	<b>1,55</b>	1,58
V	<b>9,53</b>	10,5	<b>10,34</b>	9,91	<b>0,50</b>	0,64
VI	<b>5,16</b>	9,2	<b>3,72</b>	4,47	<b>0,00</b>	0,00
VII	<b>14,58</b>	25,3	<b>39,18</b>	42,29	<b>90,03</b>	5,98

Tablica 6. Zestawienie wyników otrzymanych dla próbek z rejonu Czarna Wieś – Parzęczewo

Nr próbki	6330	6333	6398	6409	7480	7483	9882	9890	9892	9895	9897
Głębokość [m]	2650,40	2658,50	2574,85	2593,90	2689,25	2705,25	2677,00	2687,90	2690,00	2694,85	2696,05
Porowatość CT [%]	1,52	4,67	0,06	0,20	1,21	0,38	6,10	7,41	7,28	1,67	1,96
Długość średniej cięciwy [µm]	2,97	4,12	2,03	1,80	3,62	2,44	3,38	3,56	2,66	2,94	2,44
Charakterystyka Eulera	362 444	314 613	18 874	78 864	252 626	198 181	-176 341	-40 936	-14 450	29 190	65 127
Udział wody nieredukowalnej [%]	5,83	6,08	4,91	5,61	5,60	4,52	3,29	3,72	4,35	3,82	4,59
Udział wody kapilarnej [%]	2,20	3,21	0,52	0,76	3,09	1,39	2,51	2,78	4,15	3,31	4,36
Udział wody wolnej [%]	2,21	4,11	0,14	0,08	2,84	0,20	7,35	2,47	4,29	4,55	4,06
Porowatość całkowita [%]	10,24	13,40	5,57	6,45	11,53	6,11	13,16	8,97	12,79	11,67	13,00
Porowatość efektywna [%]	4,41	7,32	0,66	0,84	5,93	1,59	9,87	5,25	8,44	7,85	8,41
Współczynnik nasylenia wodą nieredukowalną [%]	56,93	45,37	88,15	86,98	48,57	73,98	25,02	41,43	34,02	32,71	35,29
Porowatość He [%]	8,41	11,90	1,83	3,86	8,39	2,99	17,40	9,49	12,70	12,20	14,30
Porowatość Hg [%]	6,93	10,53	3,48	3,15	5,18	3,76	b.d.	11,56	10,64	8,72	9,05
Przepuszczalność [mD]	0,27	1,13	0,05	0,05	0,56	0,04	127	0,57	4,69	3,20	4,05

Tablica 7. Zestawienie wyników otrzymanych dla próbek z rejonu Siekierki – Miłostaw

Nr próbki	12899	12903	12906	12909	12914	12916	12918	12920	12928	12931
Głębokość [m]	3683,40	3733,20	3860,50	4061,30	3741,20	3903,60	4073,20	3719,50	4030,85	4174,65
Porowatość CT [%]	5,79	5,45	14,95	4,67	9,37	13,41	6,64	4,36	11,86	4,73
Długość średniej cięciwy [μm]	2,44	2,93	5,02	2,73	2,49	4,13	2,51	2,77	4,05	2,33
Charakterystyka Eulera	281 115	34 500	-107 538	206 087	-226 214	-222 220	-109 529	205 763	-227 518	218 590
Udział wody nieredukowalnej [%]	2,27	3,03	3,33	3,32	2,88	2,41	2,37	2,74	3,75	3,41
Udział wody kapilarnej [%]	4,23	5,47	4,43	5,55	5,77	7,10	5,95	6,14	9,07	5,83
Udział wody wolnej [%]	1,92	4,20	9,98	1,21	2,26	6,75	1,49	1,45	3,79	0,89
Porowatość całkowita [%]	8,43	12,71	17,74	10,09	10,91	16,26	9,80	10,33	16,62	10,12
Porowatość efektywna [%]	6,16	9,67	14,41	6,77	8,03	13,85	7,43	7,59	12,86	6,72
Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną [%]	26,95	23,88	18,77	32,92	26,39	14,83	24,16	26,53	22,60	33,66
Porowatość He [%]	9,09	14,38	19,73	10,06	10,53	17,92	10,15	10,95	16,70	10,55
Porowatość Hg [%]	9,31	12,96	20,24	9,21	12,11	18,32	9,40	10,02	17,85	10,17
Przepuszczalność [mD]	0,11	0,14	5,78	0,08	0,21	0,85	0,30	0,10	0,39	0,05

Tablica 8. Zestawienie wyników otrzymanych dla próbek z rejonu Środa Wielkopolska – Kromolice

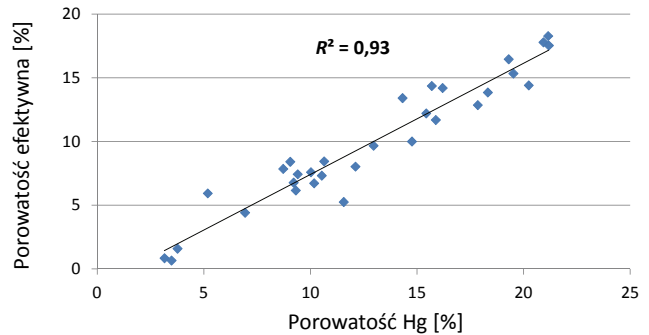
Nr próbki	8938	8941	8949	8968	9509	9513	9523	9225	9228	9232	9234
Głębokość [m]	3570,13	3583,40	3591,00	3609,00	3556,15	3568,45	3596,35	3714,00	3722,00	3727,15	3732,70
Porowatość CT [%]	11,18	20,07	12,57	21,10	17,03	12,59	10,10	21,72	11,93	10,72	13,78
Długość średniej cięciwy [μm]	4,75	5,46	3,78	5,16	5,16	4,76	3,68	6,34	3,35	3,20	5,29
Charakterystyka Eulera	-82 712	-138 712	-251 527	-209 146	-375 621	-115 573	-110 488	-133 765	-315 736	-191 216	-124 238
Udział wody nieredukowalnej [%]	2,48	2,73	2,54	2,55	2,41	1,71	2,82	2,40	2,80	3,10	3,06
Udział wody kapilarnej [%]	6,73	7,36	4,85	5,01	4,94	3,87	4,68	5,20	6,17	5,86	5,81
Udział wody wolnej [%]	7,46	9,10	8,56	12,78	13,34	10,50	7,01	12,34	6,04	4,14	9,54
Porowatość całkowita [%]	16,68	19,19	15,95	20,34	20,70	16,07	14,51	19,94	15,00	13,10	18,40
Porowatość efektywna [%]	14,20	16,46	13,41	17,79	18,28	14,36	11,69	17,54	12,21	10,00	15,34
Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną [%]	14,89	14,21	15,92	12,52	11,66	10,64	19,44	12,03	18,65	23,67	16,61
Porowatość He [%]	16,30	19,00	9,70	17,70	21,30	12,40	13,70	20,20	13,70	11,00	16,20
Porowatość Hg [%]	16,20	19,30	14,32	20,93	21,15	15,69	15,88	21,18	15,43	14,76	19,52
Przepuszczalność [mD]	31,45	11,5	2,85	90,32	253,67	35,00	3,37	37,60	0,39	0,71	18,07

Korelacja uzyskanych wartości

Na rysunku 4 przedstawiono korelację liniową pomiędzy uzyskanymi wartościami współczynnika porowatości efektywnej z NMR a porowatością uzyskaną z porozymetrii rtęciowej. Na wykresie znajduje się wartość uzyskanego współczynnika determinacji ( $R^2$ ).

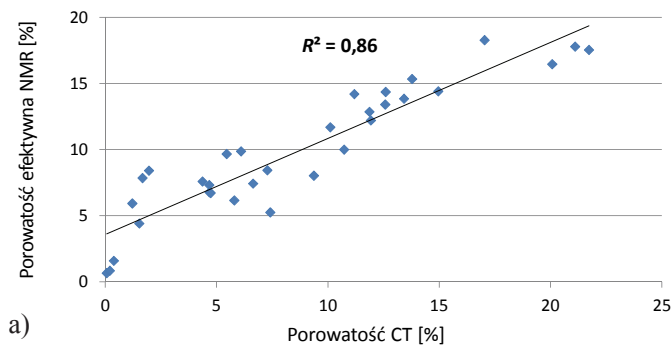
Kolejna ilustracja przedstawia zależności pomiędzy wybranymi parametrami uzyskanymi z analizy obrazu, odniesionymi do wartości otrzymanych z pozostałych metod laboratoryjnych.

Przedstawiona powyżej zależność (rysunek 5a) pomiędzy wartościami współczynnika porowatości, uzyskanymi z analizy obrazu, a porowatością efektywną była spodziewana. Wynika to z faktu, że wartość porowatości efektywnej odnosi się do dużych porów, a współczynnik porowatości z analizy obrazu micro-CT określony jest tylko na podstawie porów o rozmiarze  $\geq 6 \mu\text{m}$ . Pozytywnie zaskakuje fakt otrzymania wysokiego współczynnika determinacji

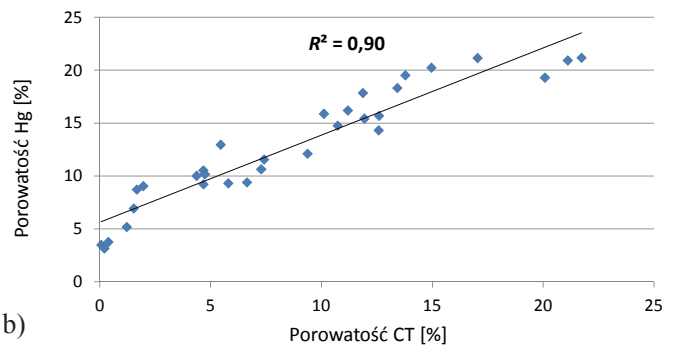


Rys. 4. Przedstawienie zależności pomiędzy współczynnikami porowatości efektywnej z NMR i porowatości z porozymetru rtęciowego

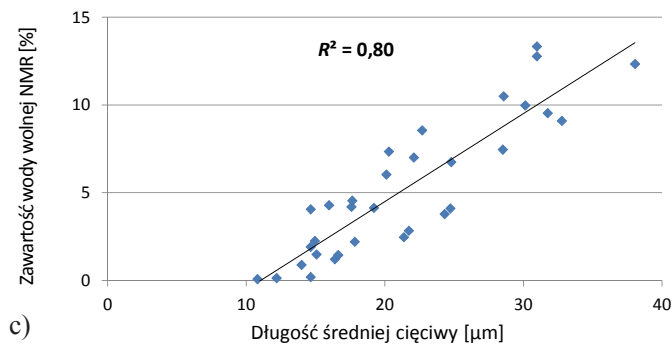
pomiędzy wartościami porowatości uzyskanymi metodami porozymetrii rtęciowej i micro-CT (rysunek 5b). Świadczyć to może o proporcjonalnym udziale mikroporowatości do



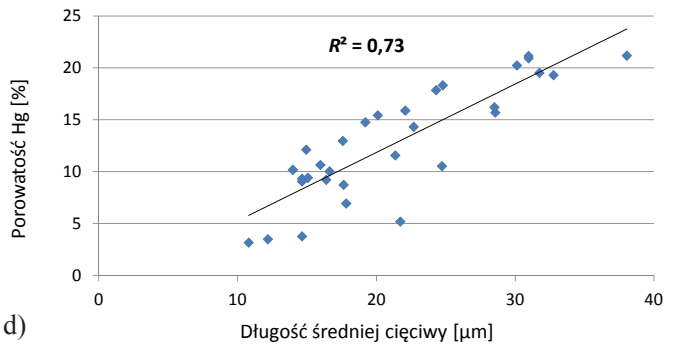
a)



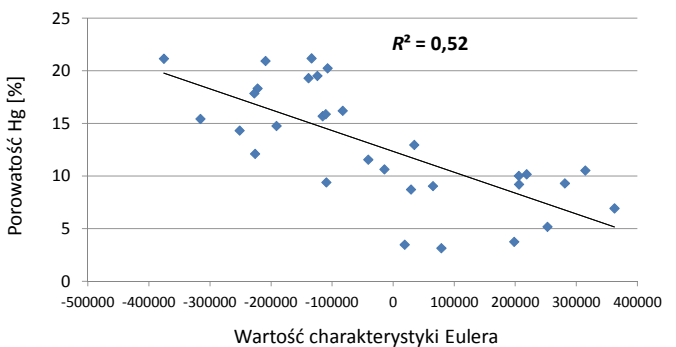
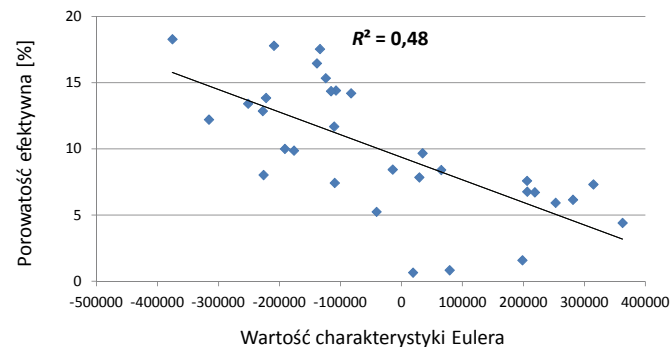
b)



c)



d)



Rys. 5. Zestawienie zależności pomiędzy wybranymi parametrami z analizy obrazu a współczynnikami porowatości uzyskanymi z innych metod laboratoryjnych



makroporowatości w badanym zbiorze próbek. Wysoki współczynnik korelacji uzyskano również pomiędzy zawartością wody wolnej określonej z NMR, a średnią długością cięciw (rysunek 5c). Potwierdza to następująca zależność: wraz ze wzrostem średnicy porów rośnie udział wody wolnej w przestrzeni porowej. Kolejny wykres (rysunek 5d) przedstawia podobną zależność pomiędzy wartością współ-

czynnika porowatości uzyskanego metodą porozymetrii rtęciowej a długością średniej cięciwy. Również dla drugiego parametru określonego z analizy obrazu (charakterystyki Eulera) uzyskano zależności pomiędzy jego wartościami a współczynnikiem porowatości efektywnej z porozymetrii rtęciowej (rysunek 5e i 5f). Jednak w tym przypadku uzyskano znacznie niższe wartości współczynnika determinacji.

## Wnioski

Po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych możliwe było rozróżnienie trzech rejonów, na podstawie właściwości przebadanych próbek. Jak przedstawiono w tabelicy 5, najlepszymi właściwościami zbiornikowymi charakteryzują się próbki z rejonu Środa Wielkopolska – Kromolice. Ze względu na wartości uzyskanych współczynników porowatości efektywnej i całkowitej kolejno znajdują się próbki z rejonu Siekierki – Miłosław. Jednak średnia geometryczna wartość współczynnika przepuszczalności próbek z rejonu Siekierki – Miłosław jest znacznie niższa niż próbek pochodzących z rejonu Czarna Wieś – Parzęczewo. Niestety wyniki wykonanych analiz nie odpowiadają na pytanie, dlaczego próbki o znacznie wyższych wartościach współczynnika porowa-

tości (porowatość całkowita i efektywna) charakteryzują się niższym współczynnikiem przepuszczalności. Również analiza obrazu wykazała, że wiele próbek z rejonu Siekierki – Miłosław posiadało dobrze połączoną strukturę porową. W takim przypadku konieczne wydaje się wykonanie opisów petrograficznych szlifów badanych próbek.

Dla przebadanego zbioru prób uzyskano kilka korelacji o wysokim współczynniku determinacji pomiędzy wykorzystanymi metodami laboratoryjnymi. Również dane otrzymane z analizy obrazu pokazały, że wraz ze wzrostem długości średniej cięciwy oraz zmniejszaniem się wartości charakterystyki Eulera rośnie współczynnik porowatości efektywnej.

Prosimy cytować: *Nafta-Gaz* 2013, nr 10, s. 735–743

Artykuł powstał na podstawie badań przeprowadzonych podczas realizacji pracy statutowej nr arch. DK-4100-58/12, pt.: *Korelacja wyników badań laboratoryjnych uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii, jądrowego rezonansu magnetycznego i porozymetrii rtęciowej*, finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- [1] Buniak A. i in.: *Perspektywy odkrycia złoz gazu ziemnego (typu tight gas) w piaskowcach eolicznych w basenie gornego czerwonego spagowca*. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Geopetrol 2008: *Nauka i technologia w rozwoju poszukiwan i wydobywania węgłowodorow w warunkach ladowych i morskich*. Zakopane 15–18.09.2008. Prace INiG 2008, nr 150, s. 61–66.
- [2] Cnudde V. et al.: *Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes*. *Engineering Geology* 2009, no. 103, pp. 76–83.
- [3] Kalam Z. et al.: *Case study in validating capillary pressure curves, relative permeability and resistivity index of carbonates from X-ray micro tomography images*. SCA2010-02, Symposium of SCA 2010, Halifax, Canada.
- [4] MAVI 1.4.0 Documentation
- [5] Moro F., Bohni H.: *Ink-Bottle Effect in Mercury Intrusion Porosimetry of Cement-Based Materials*. *Journal of Colloid and Interface Science* 2002, no. 246, pp. 135–149.
- [6] Ohser J., Katja S.: *3D Images of Material Structures. Processing and Analysis*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [7] Toriwaki J., Yonekura T.: *Euler number and connectivity indexes of a three dimensional picture*. *Forma* 2002, no. 17, pp. 183–2009.
- [8] Verges E. et al.: *3D pore analysis of sedimentary rocks*. *Sedimentary Geology* 2011, no. 234, pp. 109–115.
- [9] Vogel H.-J.: *Topological Characterization of Porous Media*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, pp. 75–92.
- [10] Zalewska J., Poszytek A., Dohnalik M.: *Charakterystyka przestrzeni porowej utworow czerwonego spagowca na podstawie rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej*. *Nafta-Gaz* 2010, nr 1, s. 10–18.
- [11] Zhang S., Klimentidis R. E., Barthelemy P.: *Porosity and permeability analysis on nanoscale FIB-SEM 3D imaging of shale rock*. SCA2011-30. Symposium of SCA 2011, Texas, Austin.



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



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA  
Starszy specjalista badawczo-techniczny, kierownik  
Zakładu Geofizyki Wiertniczej.  
Instytut Nafty i Gazu  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: zalewska@inig.pl