

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik
Institut Nafty i Gazu, Kraków

Anna Poszytek
Uniwersytet Warszawski

Ocena przestrzeni porowej piaskowców z wykorzystaniem nowoczesnych metodyk badawczych: jądrowego rezonansu magnetycznego i mikrotomografii rentgenowskiej

Wprowadzenie

Wyniki badań otrzymane metodami mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT) i jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) nie są możliwe do uzyskania konwencjonalnymi, laboratoryjnymi metodami petrofizycznymi. Metoda micro-CT najlepiej nadaje się do uzyskiwania wysokorozdzielczych, trójwymiarowych obrazów przestrzeni porowej, podczas gdy metoda NMR najlepiej sprawdza się w zrozumieniu rozkładu płynów w skale [13, 21, 22, 24, 26, 28]. Obie te metody w znacznym stopniu przyczyniają się do jakościowego rozumienia i ilościowej oceny wielu właściwości petrofizycznych skał – poprzednio trudnych do

oszacowania. Właściwości zbiornikowe skał, które mogą być oceniane na podstawie danych micro-CT obejmują: jedno- i wielofazowy przepływ płynów, przepuszczalność, średnice porów i ich przewężenia oraz przewodność porów i ich krętość [2-5, 6, 9-10, 12-13, 16-19, 22-23, 25-27].

Właściwościami zbiornikowymi skał określanymi na podstawie danych NMR są: porowatość całkowita i efektywna oraz wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieredukowalną (związaną), wodą kapilarną i wodą wolną, a także współczynnik nasycenia skały wodą nieredukowalną [7-8, 11, 14-15, 20].

Wyniki

Na podstawie kompleksowych badań laboratoryjnych (porozymetrii helowej i rtęciowej, mikroskopii optycznej i skaningowej oraz przepuszczalności), a przede wszystkim jakościowej i ilościowej mikrotomografii rentgenowskiej – badane próbki czerwonego spągowca podzielono na dwie grupy: piaskowców eolicznych i piaskowców fluwialnych, wydzielając w każdej z grup trzy podtypy. Sposób podziału został przedstawiony w pracy Zalewska i in. [29].

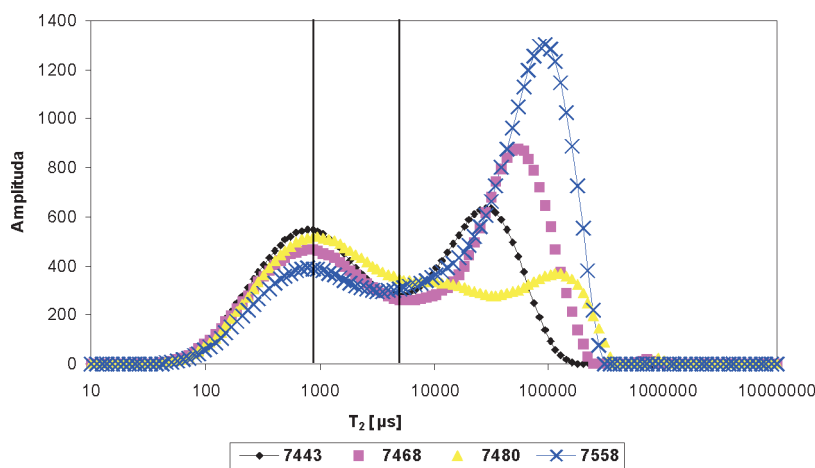
Celem tej pracy było sprawdzenie, czy zastosowany podział znajdzie odzwierciedlenie w wynikach NMR. Ocenę nasycenia przestrzeni porowej przeprowadzono

metodą NMR na podstawie uzyskanych rozkładów czasów relaksacji poprzecznej T_2 . Analizowano zarówno kształt rozkładu krzywej T_2 , jak również ilościowy udział w przestrzeni porowej wody nieredukowalnej (Kp_1), kapilarnej (Kp_2) i wolnej (Kp_3). Porowatość przestrzeni porowej zajętej przez wodę wolną charakteryzuje się długimi czasami T_2 (wartości $T_2 > 33$ ms), ponieważ relaksacja przebiega najwolniej ze względu na to, że występuje w największych porach; dla wody związanej w kapilarach skały czasy T_2 mają wartości pomiędzy 3 ms a 33 ms, a czasy relaksacji T_2 o wartościach poniżej 3 ms cechują wodę nieredukowalną zawartą w małych porach [1].

Piaskowce eoliczne – Typ A

Wyniki jądrowego rezonansu magnetycznego wskazują, że piaskowce eoliczne typu A posiadają dwumodalny rozkład czasu relaksacji poprzecznej, z dominacją wody wolnej (rysunek 1), przy czym zawartość wody wolnej dominuje nad wodą kapilarną i nieredukowalną we wszystkich analizowanych próbkach. Wyjątek stanowi próbka 7480, gdzie dominuje woda nieredukowalna (rysunek 1), a dane micro-CT pokazują, że charakter przestrzeni porowatości tej próbki (rysunek 4) i jej wewnętrzna struktura są bardzo zbliżone do pozostałych próbek typu A. Typowym przedstawicielem tej grupy jest próbka 7468 (rysunki 1

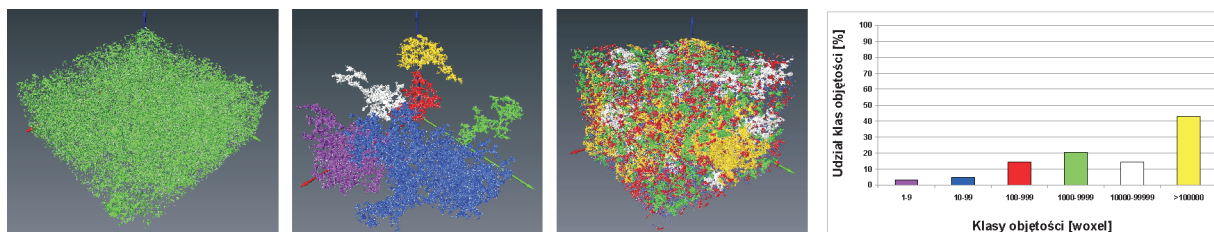
i 2). Zdecydowanie najlepsze parametry zbiornikowe posiada próbka 7558; zarówno na podstawie danych NMR ($Kp_3 = 7,45\%$, $Kp_{NMR_ef} = 10,91\%$, $Kprz = 27,07$ mD), jak i micro-CT (rysunek 1 i 3). Generalnie próbki tej grupy charakteryzują się najwyższą średnią wartością współczynnika porowatości efektywnej ($\overline{Kp_{NMR_ef}} = 7,65\%$), najwyższą średnią wartością współczynnika przepuszczalności ($\overline{Kprz} = 9,58$ mD) oraz najniższą średnią wartością współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną ($\overline{Sw_{nr}} = 40,75\%$) – w stosunku do pozostałych przebadanych próbek piaskowców eolicznych typu A (tablica 1).



Rys. 1. Rozkład czasu relaksacji poprzecznej dla próbek reprezentujących piaskowce eoliczne typu A

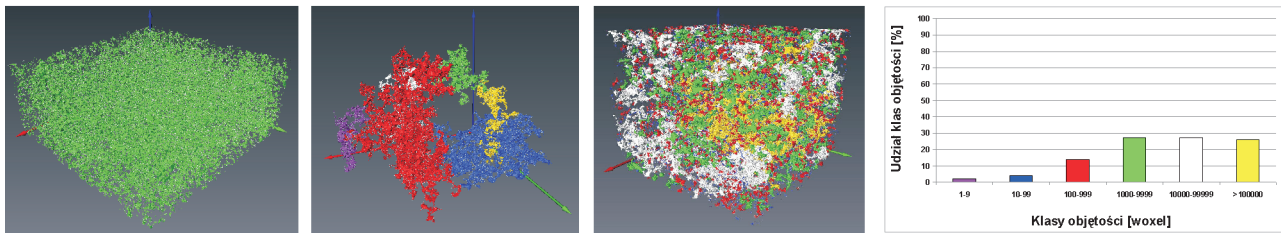
Tablica 1. Wyniki rozkładu nasycenia wodą próbek skał, uzyskane metodą NMR dla piaskowców eolicznych typu A

Numer próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. [%]		Współcz. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepusz.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_{NMR}	Kp_{NMR_ef}	Sw_{nr} [%]	$Kprz$ [mD]
7468	4,94	3,25	4,44	12,63	7,69	39,11	8,58
7480	5,60	3,09	2,84	11,53	5,93	48,57	0,56
7443	5,87	4,12	1,94	11,93	6,06	49,20	2,11
7558	3,86	3,46	7,45	14,77	10,91	26,13	27,07



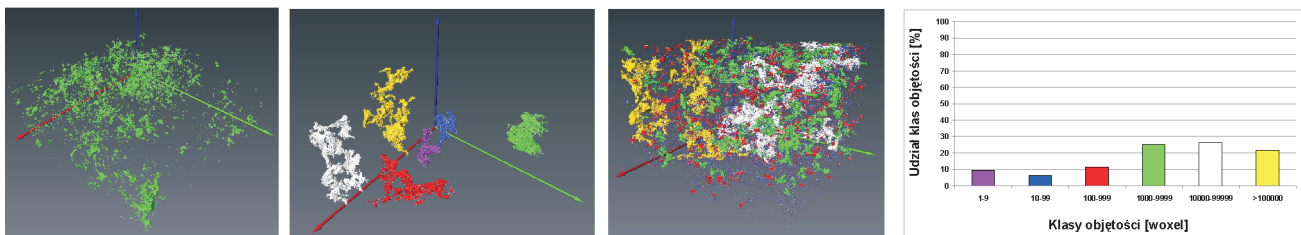
Rys. 2. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7468

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI, z dominantą przypadającą na VI klasę objętości. Klasa VI podzielona jest tylko na kilka podgrup, dlatego pory są ze sobą dobrze skomunikowane. Porowatość wykazuje pewną anizotropię. Istnieją regularne strefy o lepszej i gorszej porowatości. Klasa VI objętości występuje tylko w określonych strefach, dominując je. W pozostałych częściach dominują klasy IV i V



Rys. 3. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7558

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI. Próbkę są zróżnicowane. Próbka 7558A ma dominantę w V klasie, podczas gdy próbka 7558B ma dwie dominanty – w IV i VI klasie. Dystrybucja porowatości w próbce jest chaotyczna



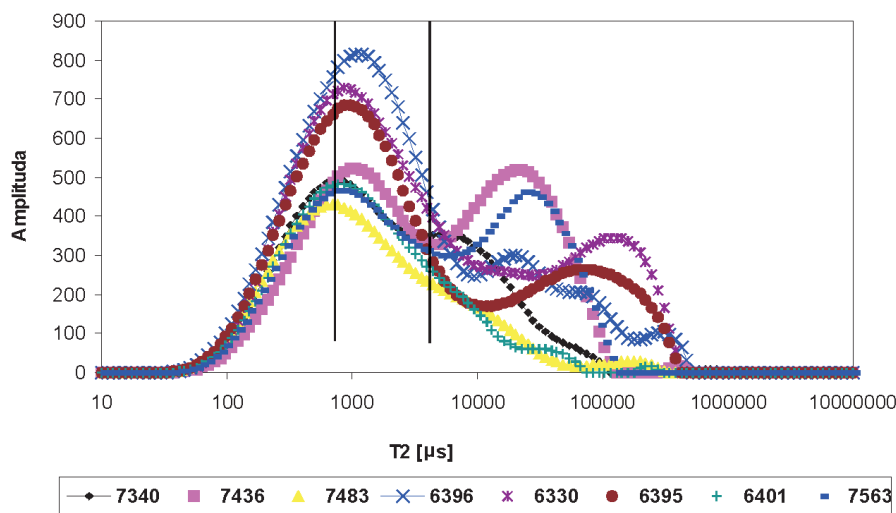
Rys. 4. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7480

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI. Występują dwie dominanty, przypadające na I i V klasę objętości. Dystrybucja poszczególnych klas nie jest równomierna. Istnieją nieregularne obszary o wyższej porowatości i większym udziale V i VI klasy objętości

Piaskowce eoliczne – Typ B

Analizując wyniki NMR dla piaskowców eolicznych typu B widzimy także dwumodalny rozkład czasu relaksacji poprzecznej T_2 (rysunek 5), ale wyraźnie obserwujemy, że największą część w przestrzeni porowej zajmuje woda kapilarna, z dużym udziałem wody nieredukowalnej. Znacząco zmniejszył się udział wody wolnej w stosunku do piaskowców eolicznych typu A, a jej wartość w niektórych próbkach jest porównywalna z ilością wody nieredukowalnej – czyli nastąpiło wyraźne przesunięcie od długich do krótszych

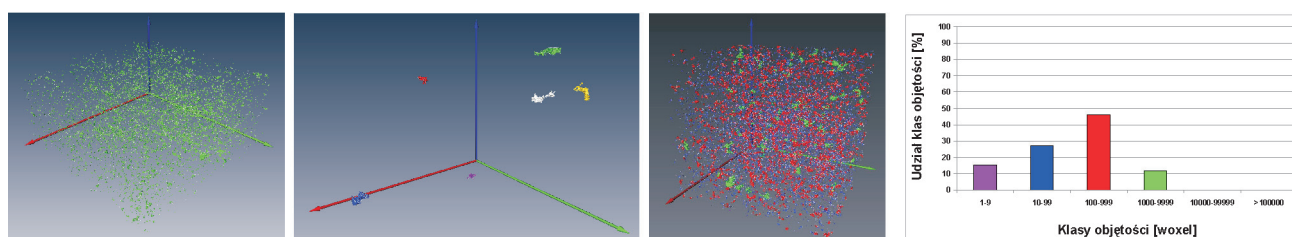
czasów relaksacji T_2 . Na wynikach mikrotomograficznych natomiast zaobserwowano przesunięcie dominanty z klasy V-VI do klasy III-IV (rysunki 6, 7, 8). Badane próbki – w odniesieniu do poprzednich – charakteryzują się niższą średnią wartością współczynnika porowatości efektywnej ($\overline{Kp}_{NMR_{ef}} = 4,04\%$), znacznie niższą średnią wartością współczynnika przepuszczalności ($\overline{Kprz} = 0,42$ mD) oraz wyższą średnią wartością współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną ($\overline{S_{Wnr}} = 61,78\%$) (tablica 2).



Rys. 5. Rozkład czasu relaksacji poprzecznej dla próbek reprezentujących piaskowce eoliczne typu B

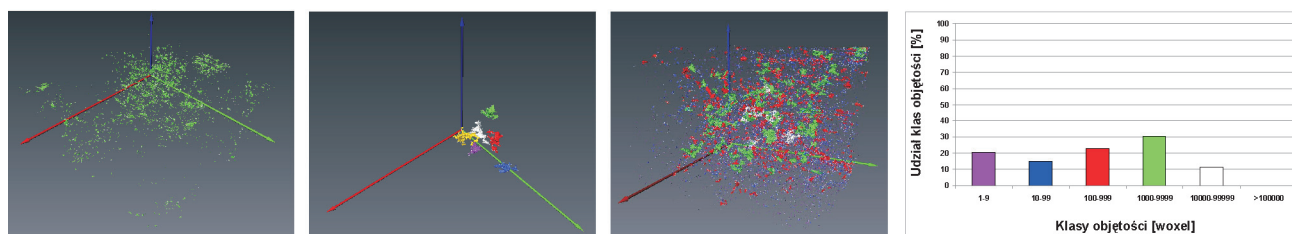
Tablica 2. Wyniki rozkładu nasycenia wodą próbek skał, uzyskane metodą NMR dla piaskowców eolicznych typu B

Numer próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. [%]		Współcz. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepus.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_{NMR}	$Kp_{NMR_{ef}}$	$S_{w_{nr}}$ [%]	$Kprz$ [mD]
7483	4,52	1,39	0,20	6,11	1,59	73,98	0,04
7430	5,73	2,82	0,35	8,90	3,17	64,38	0,10
7436	5,45	4,31	1,50	11,26	5,81	48,40	0,85
6395	8,35	2,49	2,48	13,32	4,97	62,69	1,36
6396	9,80	3,51	1,72	15,03	5,23	65,20	0,82
6401	4,77	1,33	0,15	6,25	1,48	76,32	0,01
6330	5,83	2,20	2,21	10,24	4,41	56,93	0,27
7563	4,74	3,25	1,29	9,28	4,54	51,08	0,59



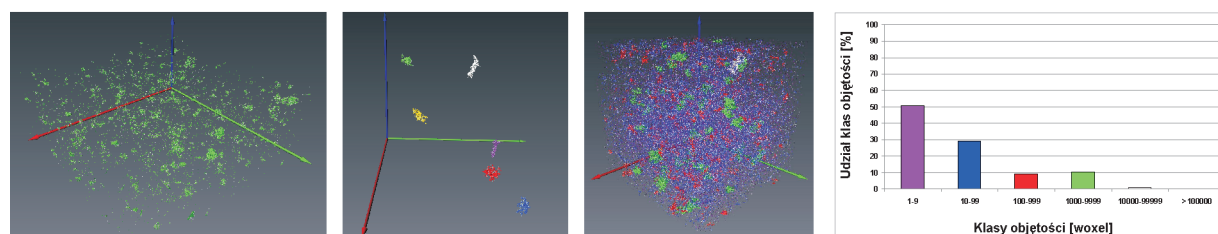
Rys. 6. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7430

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do IV, z dominacją w III klasie objętości, która jest podzielona na ponad 1000 podgrup – co nie daje zwartej przestrzeni porowej. Dystrybucja porowatości w próbce jest nierównomierna. Istnieją regularne obszary o bardzo niskiej porowatości, zdominowanej przez I i II klasę objętości. Rozprzestrzenienie klasy III i IV poza tymi obszarami jest nieregularne



Rys. 7. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7483

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do V. Próbką nie jest jednorodna pod względem rozkładu porowatości – istnieją strefy o podwyższonej i obniżonej porowatości



Rys. 8. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 6401

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do V, z dominacją przypadającą na I klasę objętości (ponad 50%). Porowatość w próbce jest rozłożona chaotycznie

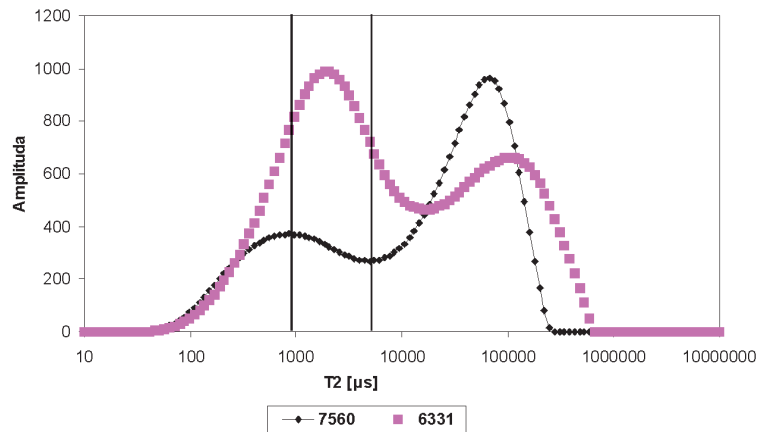
Piaskowce eoliczne – Typ C

Piaskowce eoliczne typu C są reprezentowane przez dwie próbki. Próbki te posiadają różne rozkłady czasów T_2

– pomimo tego, że mają niemal taką samą wielkość współczynnika porowatości efektywnej (tablica 3). Próbka 7560

reprezentuje znacznie lepsze właściwości zbiornikowe; dużą zawartość wody wolnej oraz niewielki udział wody kapilarnej i nieredukowalnej. Według danych micro-CT jest to próbka o najlepszej sieci porowej ze wszystkich próbek poddanych badaniom mikrotomograficznym (ry-

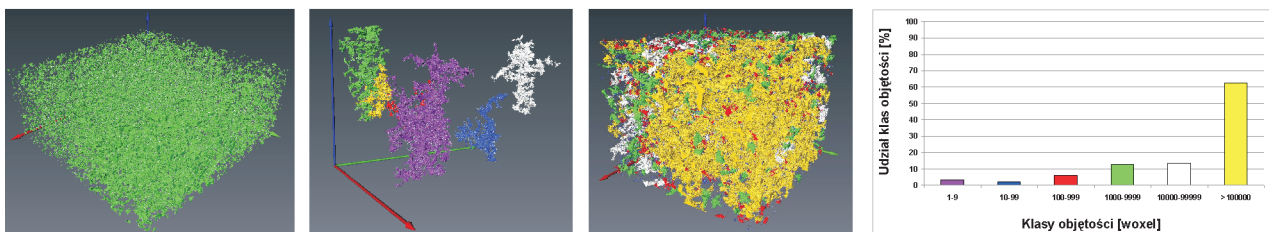
sunek 10). W próbce 6331 największą część przestrzeni porowej zajmuje woda kapilarna, a udział wody wolnej jest mniejszy niż w próbce 7560, ale również znaczący (tablica 3). Na podstawie badań micro-CT wygenerowano obraz dokumentujący otwartą szczelinę (rysunek 11).



Rys. 9. Rozkład czasu relaksacji poprzecznej dla próbek reprezentujących piaskowce eoliczne typu C

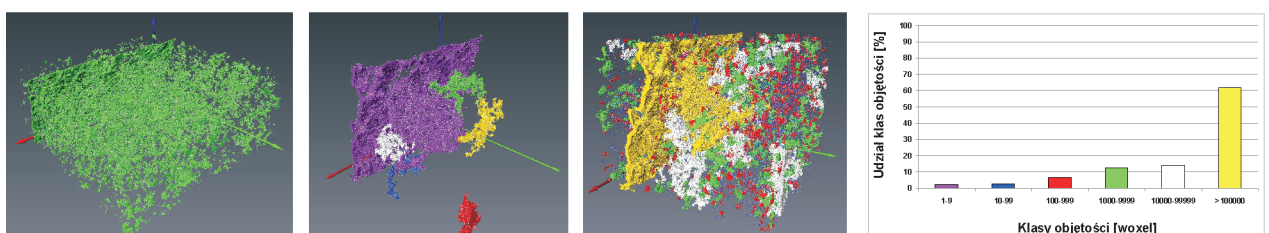
Tablica 3. Wyniki rozkładu nasycenia wodą próbek skał, uzyskane metodą NMR dla piaskowców eolicznych typu C

Numer próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. [%]		Współcz. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepuszc.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_{NMR}	$Kp_{NMR,ef}$	Sw_{nr} [%]	$Kprz$ [mD]
7560	3,93	3,41	5,10	12,44	8,51	31,59	12,26
6331	6,53	4,23	4,75	15,51	8,98	42,10	4,12



Rys. 10. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7560

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI. Porowatość z klasy VI (ponad 60%) podzielona jest tylko na kilka podgrup – co daje bardzo dobrą komunikację między porami. Porowatość wykazuje znaczną nierównomierność rozkładu, zgodną z regularnymi, pochylonymi płaszczyznami. Klasa VI stanowi dość zwarty obszar, jednak jest przedzielona klasami niższymi



Rys. 11. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 6331

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI. Dominanta przypada na VI klasę objętości. Udział podgrup w VI klasie przekracza 60% – co jest związane z występowaniem otwartej szczeliny. Klasa VI podzielona jest tylko na kilka podgrup, co daje dobrą komunikację między porami. Porowatość poza szczeliną charakteryzuje się wyraźną anizotropią. Porowatość w szczelinie to jeden zespół porów, a miejscami występują małe obszary, gdzie nie ma ciągłości porowatości w obrębie szczeliny. Szczelina ma przebieg pionowy i charakter nieregularny

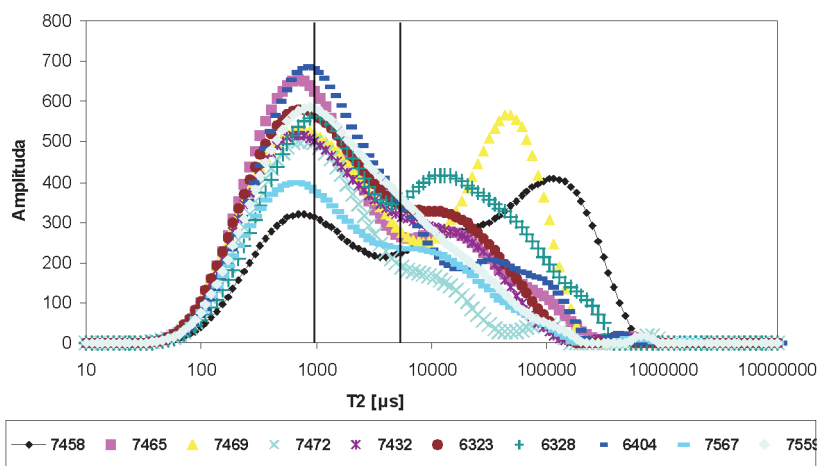
Piaskowce fluwialne – Typ A

Piaskowce fluwialne typu A charakteryzowały się porowatością efektywną w zakresie od 1,60 do 6,23%, przy średniej wartości 3,69%. Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną wprawdzie zmieniał się w szerokim zakresie ($S_{w_{nr}} \in 36,17 \div 76,01\%$), ale większość próbek posiadała bardzo zbliżone wartości tego parametru – w zakresie 63÷66%. Dominuje woda nieredukowalna wraz z wodą kapilarną. Podobnie jak w analizie mikrotomograficznej, przebieg krzywej rozkładu czasu relaksacji poprzecznej jest bardzo zbliżony do eolicznego typu B (rysunki 5 i 12). Parametry wyznaczone metodą NMR są niższe w stosunku do piaskowców eolicznych typu B – znacząco zmniejszył się udział wody wolnej, jak również zmniejszyła się wartość współczynników porowatości ($K_p \in 1,6 \div 6,23\%$,

$\overline{K_p} = 3,69$) i przepuszczalności ($K_{prz} \in 0,01 \div 1,13$ mD, przy $\overline{K_{prz}} = 0,19$ mD) (tablica 4). Wzrosła także wartość współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną.

Próbka 7458 charakteryzuje się najlepszymi parametrami spośród próbek tej grupy, tzn. ma najwyższą wartość współczynnika porowatości efektywnej ($K_{p_{NMR_{ef}}} = 6,23\%$), najwyższą wartość współczynnika przepuszczalności ($K_{prz} = 1,13$ mD) oraz najniższą wartość współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną ($S_{w_{nr}} = 36,17\%$). Z danych mikrotomografii rentgenowskiej wynika, że próbka ta charakteryzuje się najlepszą siecią porową ze wszystkich utworów fluwialnych (rysunek 13).

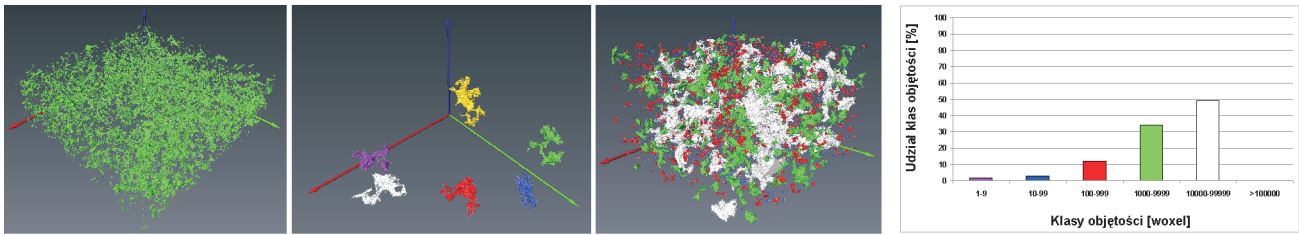
Nieco gorsze parametry niż próbka 7458 reprezentuje próbka 7469: $K_{p_{NMR_{ef}}} = 5,66\%$, $K_{prz} = 0,14$ mD, $S_{w_{nr}} = 51,04\%$ (rysunki 12 i 14).



Rys. 12. Rozkład czasu relaksacji poprzecznej dla próbek reprezentujących piaskowce fluwialne typu A

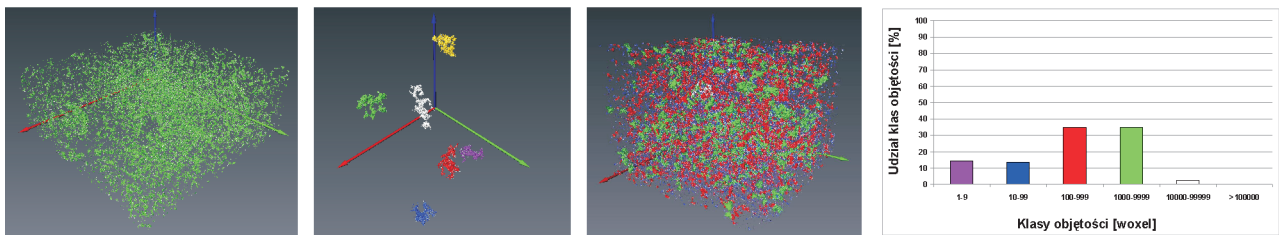
Tablica 4. Wyniki rozkładu nasycenia wodą próbek skał, uzyskane metodą NMR dla piaskowców fluwialnych typu A

Numer próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. [%]		Współcz. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepusz.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	K_{p_1}	K_{p_2}	K_{p_3}	$K_{p_{NMR}}$	$K_{p_{NMR_{ef}}}$	$S_{w_{nr}}$ [%]	K_{prz} [mD]
7458	3,53	2,52	3,71	9,76	6,23	36,17	1,13
7465	6,72	2,45	0,95	10,12	3,40	66,40	0,02
7469	5,90	2,99	2,67	11,56	5,66	51,04	0,14
7472	5,07	1,36	0,24	6,67	1,60	76,01	0,01
7432	7,21	3,32	0,75	11,28	4,07	63,92	0,11
6323	4,82	2,24	0,57	7,63	2,81	63,17	0,13
6328	4,37	2,81	1,50	8,68	4,31	50,35	0,16
6404	7,49	2,56	1,14	11,19	3,70	66,93	0,06
7567	4,01	1,78	0,42	6,21	2,20	64,57	0,05
7559	5,73	2,43	0,49	8,65	2,92	66,24	0,04



Rys. 13. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7458

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do V. Dominanta przypada na V klasę objętości (prawie 60%), jednak jest ona podzielona na kilkadziesiąt podgrup, co nie daje dobrej komunikacji między zespołami porów. Porowatość wykazuje pewną anizotropię. Istnieją regularne strefy o lepszej i gorszej porowatości. Dystrybucja porowatości w obrębie IV klasy objętości podkreśla tę anizotropię



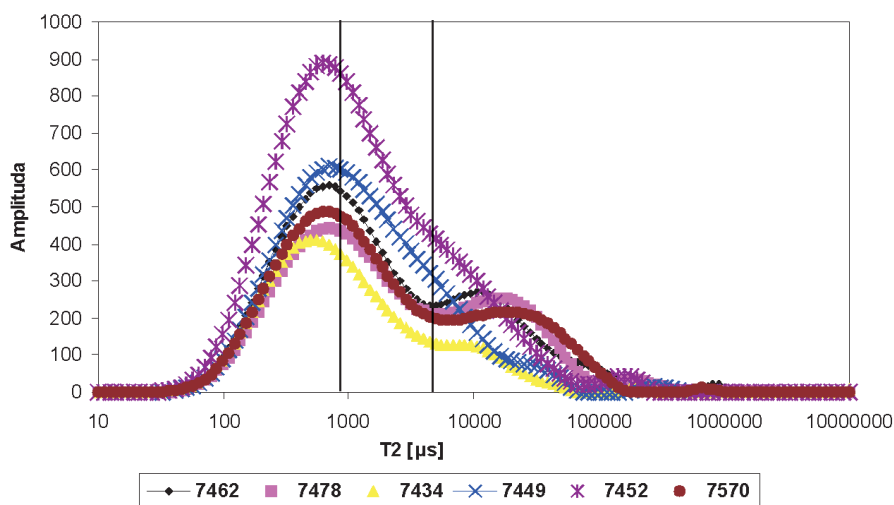
Rys. 14. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7469

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do V, z dominantą w III klasie objętości (ponad 30%), jednak jest ona podzielona na dużą ilość podgrup – co nie daje dobrej komunikacji między zespołami porów. W próbce istnieją nieregularne obszary o obniżonej porowatości, gdzie dominują niższe klasy objętości.

Piaskowce fluwialne – Typ B

Piaskowce fluwialne typu B generalnie charakteryzują się jednomodalnym rozkładem czasu relaksacji poprzecznej. W stosunku do utworów fluwialnych typu A obserwuje się znaczne zmniejszenie udziału wody wolnej (rysunek 15). Próbki tej grupy cechuje niewielka porowatość efektywna ($Kp_{NMR_{ef}} \in 1,09 \div 3,16\%$, przy $\overline{Kp}_{NMR_{ef}} = 2,95\%$),

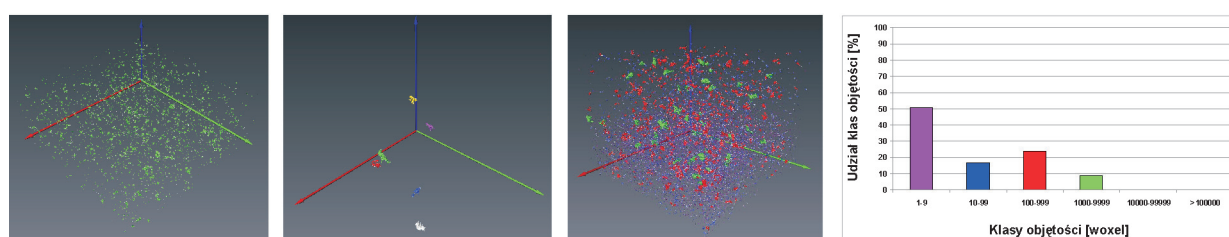
minimalna wartość współczynnika przepuszczalności ($K_{prz} \in 0,02 \div 0,3$ mD) oraz wysoka wartość współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną ($S_{w_{nr}} \in 66,06 \div 79,89\%$) (tablica 5). Charakterystykę mikrotomograficzną przedstawicieli tej grupy (próbki 7462 i 7434) zilustrowano na rysunkach 16 i 17.



Rys. 15. Rozkład czasu relaksacji poprzecznej dla próbek reprezentujących piaskowce fluwialne typu B

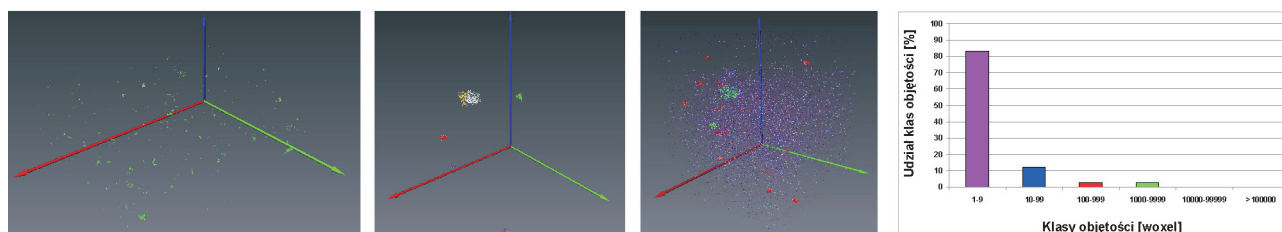
Tablica 5. Wyniki rozkładu nasycenia wodą próbek skał, uzyskane metodą NMR dla piaskowców fluwialnych typu B

Numer próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. [%]		Współcz. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepusz.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_{NMR}	$Kp_{NMR_{ef}}$	Sw_{nr} [%]	$Kprz$ [mD]
7462	5,66	2,14	0,61	8,41	2,75	67,30	0,06
7478	4,66	2,15	0,57	7,38	2,72	63,14	0,03
7434	4,33	1,00	0,09	5,42	1,09	79,89	0,02
7449	7,00	1,85	0,16	9,01	2,01	77,69	0,05
7452B	9,75	2,83	0,33	12,91	3,16	75,52	0,30
7570	4,57	1,74	0,61	6,92	2,35	66,04	0,04



Rys. 16. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7462

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do IV. Dominanta przypada na I klasę objętości (ponad 50%) i jest podzielona na bardzo dużą ilość podgrup – co nie daje dobrej komunikacji między zespołami porów. Porowatość tworzy odizolowane od siebie zespoły o niewielkich objętościach, nie stanowiących większej ciągłości sieci porów w żadnym z kierunków



Rys. 17. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7434

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do IV. Dominanta przypada na I klasę objętości (ponad 80%). Porowatość jest wykształcona w postaci drobnych, izolowanych podgrup. Dystrybucja porowatości nie jest równomierna – próbka wykazuje nieregularną anizotropię. Są obszary gdzie porowatości prawie nie ma

Piaskowce fluwialne – Typ C

Piaskowce fluwialne typu C stanowią zbiór różnych próbek ze szczelinami i w zależności od tego, czy szczelina jest otwarta, czy też częściowo uległa zacementowaniu, w różny sposób kształtuje się krzywa rozkładu czasu relaksacji poprzecznej T_2 . W zbiorze wyróżnia się próbka 6325, gdzie dominujący udział ma woda wolna (rysunek 18), a współczynnik przepuszczalności wynosi 1,64 mD (tablica 6). Jak wynika z danych mikrotomograficznych, w próbce tej występuje otwarta szczelina, umożliwiającą doskonałą komunikację między porami (rysunek 19).

Inny kształt krzywej rozkładu czasu T_2 ma próbka 6327,

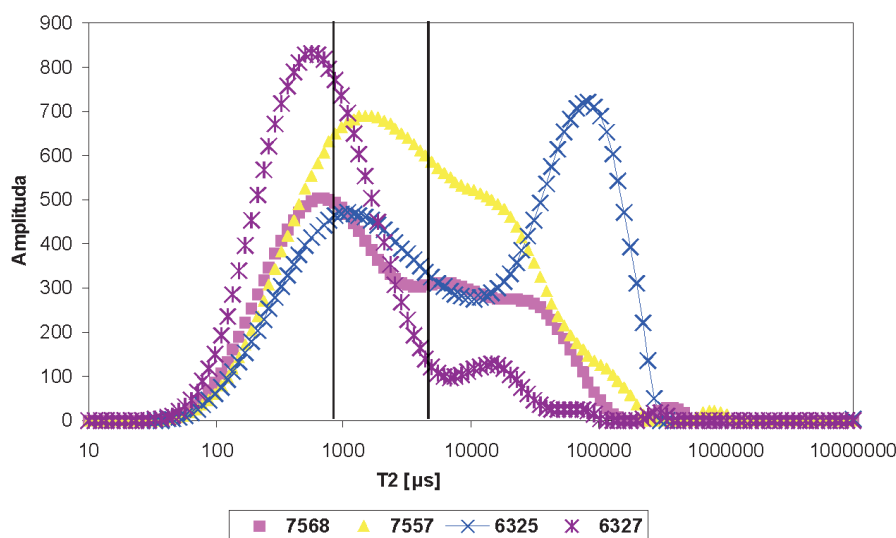
w której dominujący jest udział wody nieredukowalnej (rysunek 18). Na podstawie analizy mikrotomograficznej stwierdzono, że w próbce tej występuje jedna większa, otwarta szczelina i dwie mniejsze, a porowatość poza szczelinami jest bardzo mała (związana głównie z I klasą objętości) i rozłożona nierównomiernie.

Odmienne kształt krzywej rozkładu nasycień uzyskany metodą jądrowego rezonansu magnetycznego reprezentuje próbka 7557 (rysunek 18), gdzie udział wody kapilarnej jest największy. Kształt krzywej oraz brak wąskiego piku w zakresie czasów T_2 świadczy o braku jednolitego systemu porów. Z wizualizacji 3D otrzymanej w wyniku badań me-

tołą micro-CT uzyskano obraz częściowo scementowanej szczeliny (rysunek 20).

W tabelicy 7 zestawiono średnie wartości parametrów określonych metodą NMR w poszczególnych typach skał. Generalnie obserwujemy, że dla określonego rodzaju piaskowca – wraz ze zmianą typu – zmniejsza się udział

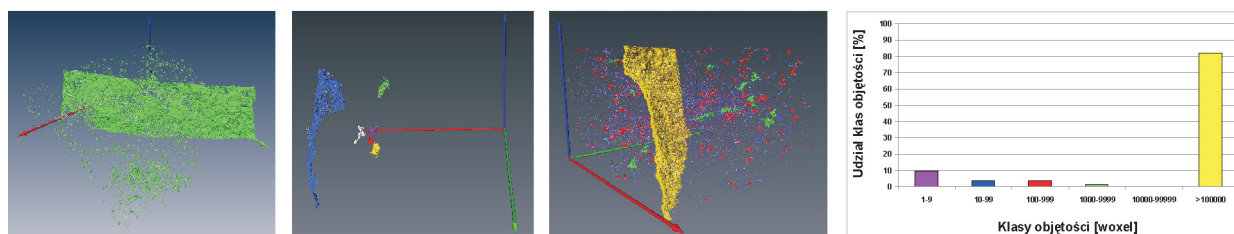
wody wolnej i wzrasta zawartość wody nieredukowalnej, a co za tym idzie – zmniejsza się wartość współczynnika porowatości efektywnej i przepuszczalności, natomiast wzrasta współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną. Z zasady tej wyłamują się próbki piaskowców fluwialnych typu C, gdzie o wielkości parametrów decydują szczeliny.



Rys. 18. Rozkład czasu relaksacji poprzecznej dla próbek reprezentujących piaskowce fluwialne typu C

Tabela 6. Wyniki rozkładu nasycenia wodą próbek skał, uzyskane metodą NMR dla piaskowców fluwialnych typu C

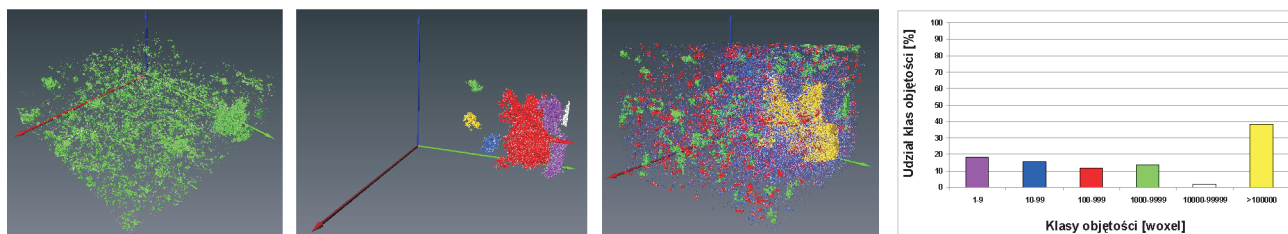
Numer próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. [%]		Współcz. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepusz.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_{NMR}	$Kp_{NMR_{ef}}$	Sw_{nr} [%]	$Kprz$ [mD]
7568	4,96	2,51	0,79	8,26	3,30	60,05	0,06
7557	6,35	4,40	1,17	11,92	5,57	53,27	0,38
6325	3,87	2,37	3,64	9,88	6,01	39,17	1,64
6327	6,38	0,81	0,11	7,30	0,92	87,40	0,94



Rys. 19. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 6325

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI. Na wykresie występują dwie dominanty, przypadające na I i VI klasę objętości – co spowodowane jest obecnością otwartej szczeliny (klasa VI).

Doskonała komunikacja między porami, możliwa tylko w przypadku otwartych szczelin



Rys. 20. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki 7557

Pory tworzą podgrupy o wielkościach w klasach od I do VI, a dominanty występują w I i VI klasie objętości. VI klasa stanowi zwartą przestrzeń otoczoną przez klasy I i II, gdzie widoczna jest częściowo scementowana szczelina

Tablica 7. Zestawienie średnich wartości parametrów określonych metodą NMR w poszczególnych typach skał

	Zawartość wody [%]			Współ. porowat. [%]		Współ. nasycenia wodą niereduk.	Współcz. przepusz.
	niered.	kapil.	wolnej	całkowitej	efektywnej		
	\overline{Kp}_1	\overline{Kp}_2	\overline{Kp}_3	\overline{Kp}_{NMR}	\overline{Kp}_{NMR_ef}	\overline{Sw}_{nr} [%]	\overline{Kprz} [mD]
Piaskowiec eoliczny – typ A	5,06	3,48	4,17	12,71	7,65	40,75	9,58
Piaskowiec eoliczny – typ B	6,15	2,66	1,24	10,05	3,90	62,37	0,51
Piaskowiec fluwialny – typ A	5,49	2,44	1,24	9,17	3,69	60,48	0,19
Piaskowiec fluwialny – typ B	5,99	1,95	0,40	8,34	2,95	71,60	0,08
Piaskowiec fluwialny – typ C	5,39	2,52	1,43	9,34	3,95	59,98	0,76

Podsumowanie

Analizowane próbki charakteryzowały się zróżnicowaną genezą, właściwościami petrofizycznymi i zbiornikowymi.

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu mikrotomografii rentgenowskiej pozwoliły na interpretację struktury przestrzeni porowej badanych próbek, oraz na stwierdzenie, że sieć ta jest słabo rozwinięta. Umożliwiły także wydzielenie sześciu różnych typów porów (z uwagi na ich objętość) w piaskowcach czerwonego spągowca.

Wyróżnione typy zostały przeanalizowane na podstawie danych NMR. Stwierdzono zależność między rozkładem czasów relaksacji poprzecznej T_2 a charakterem nasycenia

przestrzeni porowej w utworach eolicznych i fluwialnych. Zauważono jednoznaczność relacji między wartością czasów T_2 a typem porów; wraz ze zmianą typu porów następuje przesunięcie czasu T_2 – od czasów najdłuższych (duże pory), w kierunku czasów krótszych (mniejsze pory). Najlepsze parametry petrofizyczne – w aspekcie gromadzenia i migracji mediów – otrzymano dla piaskowców eolicznych typu A. Najsłabszymi właściwościami cechowały się piaskowce fluwialne typu B.

Klasyfikacja właściwości skał przeprowadzona przy zastosowaniu mikrotomografii rentgenowskiej zgadza się z definiowaniem tych właściwości metodą NMR.

Artykuł nadesłano do Redakcji 15.07.2009. Przyjęto do druku 29.10.2009.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Allen D.F., Flaum C., Ramakrishnan T.S., Bedford J., Castelijnjs K., Fairhurst D., Gubelin G., Heaton N., Minh C.C., Norville M.A., Seim M.R., Pritchard T., Ramamoorthy R.: *Trends in NMR Logging*. Oilfield Review, 12 (3): 2-19.
- [2] Appoloni C.R., Macedo A., Fernandes C.P., Philippi P.C.: *Characterization of porous microstructure by X-ray microtomography*. X-ray Spectrometry, vol. 31, p. 124-127, 2002.
- [3] Arns C.H., Knackstedt M.A., Pinczewski W.V., Martys N.S.: *Virtual permeametry on microtomographic images*. Part A. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 45, p. 41-46, 2004.
- [4] Arns C.H.: *A comparison of pore size distributions derived by NMR and X-ray CT techniques*. Part B. Physica A, vol. 339, p. 159-165, 2003.
- [5] Arns J.-Y., Arns C.H., Sheppard A.P., Sok R.M., Knackstedt M.A., Pinczewski W.V.: *Relative permeability from tomographic images; effect of correlated heterogeneity*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 39, p. 247-259, 2003.

- [6] Arns C.H., Knackstedt M.A., Pinczewski W.V., Garboczi E.J.: *Computation of linear elastic properties from microtomographic images: methodology and agreement between theory and experiment*. Geophysics, vol. 67, p. 1396-1405, 2002.
- [7] Ciechanowska M., Zalewska J.: *Analiza zbiornikowych właściwości skał przy wykorzystaniu zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego NMR*. Nafta-Gaz nr 1, 2002.
- [8] Chang D., Vinegar H., Morris Ch., Straley Ch.: *Effective Porosity, Producing Fluid and Permeability in Carbonates from NMR Logging*. The Log Analyst, p. 60-72, March-April 1997.
- [9] Coles M.E., Hazlett R.D., Spanne P., Soll W.E., Muegge E.L., Jones K.W.: *Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography*. Part A. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 19, p. 55-63, 1998.
- [10] Coles M.E., Hazlett R.D., Muegge E.L., Jones K.W., Andrews A., Dowd B., Siddons P., Peskin A., Spanne P., Soll W.E.: *Developments in synchrotron X-ray microtomography with applications to flow in porous media*. Part B. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, vol. 1, p. 288-296, 1998.
- [11] Jarzyna J.: *Otworowe profilowanie jądrowego rezonansu magnetycznego – nowa, efektywna metoda wyznaczania właściwości zbiornikowych skał*. Nafta-Gaz nr 5, s. 215-222, 1998.
- [12] Jones K.W., Feng H., Tomov S., Winters W.J., Prodanovic M., Mahajan D.: *Characterization of methane hydrate host sediments using synchrotron-computed microtomography (CMT)*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 56, p. 136-145, 2007.
- [13] Kayser A., Knackstedt M., Ziauddin M.: *A closer look at pore geometry*. Oilfield Review, vol. 18, no. 1, p. 4-13, 2006.
- [14] Kenyon W.E.: *Petrophysical Principles of Applications of NMR Logging*. The Log Analyst, March-April, p. 21-43.
- [15] Kleinberg R.L., Vinegar H.J.: *NMR Properties of Reservoir Fluids*. The Log Analyst, p. 20-32, November-December 1996.
- [16] Lindquist W.B., Lee S.: *Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media*. Journal of Geophysical Research, vol. 101 (B4), p. 8297-8310, 1996.
- [17] Lindquist W.B., Venkatarangan A.: *Investigating 3D geometry of porous media from high resolution images*. Physics and Chemistry of the Earth (A), vol. 25, p. 593-599, 1999.
- [18] Lindquist W.B., Venkatarangan A., Dunsmuir J., Wong T-f.: *Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones*. Journal of Geophysical Research, vol. 105, p. 21509-21527, 2000.
- [19] Nakashima Y., Nakano T., Nakamura K., Uesugi K., Tsuchiyama A., Ikeda S.: *Three-dimensional diffusion of non-sorbing species in porous sandstone: computer simulation based on X-ray microtomography using synchrotron radiation*. Journal of Contaminant Hydrology, vol. 74, p. 253-264, 2004.
- [20] Ostroff G.M., Shorey D.S., Georgi D.T.: *Integration of NMR and conventional log data for improved petrophysical evaluation of shaly sands*. SPWLA 40th Annual Logging Symposium, Oslo, p. 0001-4, 1999.
- [21] Padhy G.S., Lemaire C., Amirtharaj E.S., Ioannidis M.A.: *Pore size distribution in multiscale porous media as revealed by DDIF-NMR, mercury porosimetry and statistical image analysis*. Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 300, p. 222-234, 2007.
- [22] Prodanović M., Lindquist W.B., Seright R.S.: *3D image-based characterization of fluid displacement in a Berea core*. Advances in Water Resources, vol. 30, p. 214-226, 2007.
- [23] Spanne P., Thorvert J.F., Jacquin C.J., Lindquist W.B., Jones W.B., Adler P.M.: *Synchrotron computed microtomography of porous media: topology and transports*. Physical Review Letters, vol. 73, p. 2001-2004, 1994.
- [24] Spanne P., Rivers M.L.: *Computerized microtomography using synchrotron radiation from the NSLS*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 24-25, p. 1063-1067, 1987.
- [25] Turner M.L., Knüfing L., Arns C.H., Sakellariou A., Senden T.J., Sheppard A.P., Sok R.M., Limaye A., Pinczewski W.V., Knackstedt M.A.: *Three-dimensional imaging of multiphase flow in porous media*. Physica A, vol. 339, p. 166-172, 2004.
- [26] Wellington S.L., Vinegar H.J.: *X-ray computerized tomography*. Journal of Petroleum Technology, vol. 39, p. 885-898, 1987.
- [27] Wildenschild D., Hopmans J.W., Vaz C.M.P., Rivers M.L., Rikard D., Christensen B.S.B.: *Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations*. Journal of Hydrogeology, vol. 267, p. 285-297, 2002.
- [28] Vinegar H.J.: *X-ray CT and NMR imaging of rocks*. Journal of Petroleum Technology, vol. 38, p. 257-259, 1986.
- [29] Zalewska J., Dohnalik M., Poszytek A.: *Charakterystyka przestrzeni porowej utworów czerwonego spągowca na podstawie rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej*. Nafta-Gaz nr 1, 2009.



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. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych.



Dr Anna POSZYTEK – absolwentka Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie obroniła pracę doktorską na temat właściwości zbiornikowych utworów górnego czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej. Obecnie pracuje jako adiunkt na Wydziale Geologii UW w Zakładzie Geologii Żłóż, kontynuując tematykę badawczą.