

Jadwiga Zalewska, Jan Kaczmarczyk, Marek Dohnalik, Dariusz Cebulski
Institut Nafty i Gazu, Kraków

Anna Poszytek
Uniwersytet Warszawski, Warszawa

Analiza własności zbiornikowych skał węglanowych z wykorzystaniem mikrotomografii rentgenowskiej

Wstęp

W poszukiwaniach naftowych w coraz większym stopniu zwraca się uwagę na bardziej skuteczne charakteryzowanie skał zbiornikowych, w celu ograniczenia ryzyka związanego z zagospodarowaniem nowego pola, lepszego wytyczania stref produkcyjnych oraz identyfikowania nowych zasobów. Podstawowymi narzędziami dla charakterystyki skał zbiornikowych są profilowania otworowe oraz – prowadzone w ograniczonym zakresie – pomiary laboratoryjne rdzeni wiertniczych, w celu kalibrowania tych profilowań otworowych i ustalania zależności pomiędzy wynikami z pomiarów geofizyki

wiertniczej a właściwościami petrofizycznymi z badań laboratoryjnych. Zależności te są zazwyczaj empiryczne i mogą wprowadzać znaczną niedokładność w interpretacji pomiarów otworowych oraz – w powstającym na ich podstawie – opisie skał zbiornikowych. Główne źródło niepewności jest związane z niedokładną oceną złożonej mikrostruktury skały w skali porowej. Znaczące ograniczenie stopnia niepewnych ocen wymaga opracowania technik dokładnego charakteryzowania mikrostruktury skał w tej skali i powiązania uzyskanych informacji z mierzonymi właściwościami petrofizycznymi [1].

Metodyka prowadzenia badań

Analizę własności zbiornikowych skał węglanowych wykonano w oparciu o wyniki badań porowatości; z wykorzystaniem mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT), przepuszczalności i mikroskopowych płytek cienkich.

Materiał badawczy stanowiły 23 próbki, reprezentujące poziom dolomitu głównego, pochodzące z dwóch otworów poszukiwawczych z rejonu północnej monokliny przedsudeckiej. Badane próbki były reprezentowane przez dolomity o zróżnicowanych strukturach i teksturach oraz o zróżnicowanym charakterze porowatości.

Na podstawie wykonanych badań micro-CT stwierdzono, że analizowane skały charakteryzują się generalnie niskimi i średnimi właściwościami zbiornikowymi. O ile porowatość w wielu próbkach przekraczała 20%, to przepuszczalność zaledwie kilku próbek wynosiła kilkadziesiąt mD. Dość często wysokiej porowatości (> 20%) towarzyszyła bardzo

niska przepuszczalność (kilka mD). Próba analizy zmienności porowatości na podstawie wykresu rozkładu klas porowatości, jak to miało miejsce w przypadku piaskowców czerwonego spągowca [7], skończyła się niepowodzeniem. Piaskowce, w odróżnieniu od skał węglanowych, pomimo różnej genezy można było scharakteryzować tymi samymi parametrami: uziarnieniem, wysortowaniem, obecnością matriksu, cementacją i kompaktacją, które przekładają się na porowatość i mają swój określony zapis na wykresie rozkładu klas porowatości [7]. Dla skał węglanowych tak prostego zapisu nie ma, ze względu na znacznie zróżnicowaną charakterystykę strukturalną, teksturalną i petrograficzną, wynikającą ze środowiska depozycji oraz diagenety tych skał. Warunkuje to powstanie zróżnicowanej, charakterystycznej dla danych warunków sieci porowej [3, 6]. Obserwacje mikroskopowe próbek dolomitu głównego

potwierdziły zróżnicowane tekstury, struktury i charakter porowatości badanych skał. Próbki charakteryzowały się także znacznym zaangażowaniem procesów diagenety, szczególnie cementacji i dolomityzacji. Zbyt wiele zmiennych związanych z petrografią badanych skał spowodowało konieczność zastosowania bardzo schematycznego podziału mikrofacjalnego, uwzględniającego teksturę, stopień przeobrażenia oraz obserwowaną w szlifach porowatość.

Analiza porowatości, na podstawie wyników badań mikrotomografii rentgenowskiej, opierała się na podziale sieci porowej na podgrupy. Każda z podgrup to zespół porów połączonych ze sobą, lecz nie skomunikowanych z innymi podgrupami. Podgrupy zostały podzielone na klasy ze względu na swoją objętość, zgodnie z oznaczeniami przedstawionymi poniżej (tablica 1). Szczegółowy opis prowadzenia badań i analizy porowatości metodą micro-CT można znaleźć w pracy [7].

Podział na klasy pozwolił na wykonanie wykresów umożliwiających półilościową analizę uzyskanych wyników. Wykresy zostały wykonane w dwóch wersjach: pierwszy to wykres liczebności podgrup w poszczególnych klasach objętości, pokazujący jak bardzo zróżnicowana objętościowo jest dana klasa, a drugi wykres prezentuje procentowy udział poszczególnych klas objętości porowa-

tości w danej próbce. Analiza tych wykresów pozwoliła na interpretację porowatości pod względem „spójności” sieci porowej, czyli stwierdzenia, czy sieć porowa jest zdominowana przez jeden zespół porów, czy też jest rozproszona i podzielona na wiele podgrup nieskomunikowanych ze sobą.

Kolejnym etapem interpretacji sieci porowej była analiza wizualizacji 3D jej struktury. Została ona wykonana dla całej próbki oraz niezależnie dla każdej klasy objętości sieci porowej. Wizualizacja 3D całej próbki z podziałem na klasy objętości pozwoliła na określenie anizotropii sieci porowej oraz relacji poszczególnych klas objętości porowatości względem siebie, natomiast wizualizacja 3D poszczególnych klas objętości dała szczegółowe informacje na temat dystrybucji porowatości i umożliwiła porównanie wyników micro-CT z obserwacjami mikroskopowymi. Na podstawie niezależnych wizualizacji 3D klas objętości opisywano anizotropię rozkładu porowatości, segmentację sieci porowej, charakter porów (ich wielkość, kształt, rozmieszczenie) oraz charakter kanalików łączących pory (ich średnice względem porów oraz ilość kanalików dochodzących do porów). Porównując wyniki badań petrograficznych oraz wizualizacji 3D, opisano charakter porowatości obserwowany w obrębie poszczególnych klas.

Tablica 1. Sposób oznaczenia objętości klas porów

| | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Objętość poru [woksel] | 1–9 | 10–99 | 100–999 | 1 000–9 999 | 10 000–99 999 | > 100 000 |
| Objętość poru [μm^3] | $2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^3$ | $2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^5$ | $2 \cdot 10^5$ – $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$ – $2 \cdot 10^7$ | $> 2 \cdot 10^7$ |
| Klasa | I | II | III | IV | V | VI |
| Kolor | Żółty | Niebieski | Czerwony | Zielony | Biały | Fioletowy |

Wyniki badań

Badane próbki analizowano pod względem: wartości porowatości micro-CT, dystrybucji porowatości na wykresach, charakteru sieci porowej na wizualizacjach 3D, charakterystyki mikrofacjalnej i wartości przepuszczalności. W wyniku tej analizy wyróżniono 5 grup skał zbiornikowych:

- G01 – grainstone onkoidowy o dobrych właściwościach zbiornikowych,
- G02 – grainstone onkoidowy o obniżonej przepuszczalności,
- G03 – grainstone onkoidowy o obniżonej porowatości,
- DK – dolomit krystaliczny o złych właściwościach zbiornikowych,
- DF – dolomity o bardzo złych właściwościach zbiornikowych.

G01 – grainstone onkoidowy o dobrych właściwościach zbiornikowych

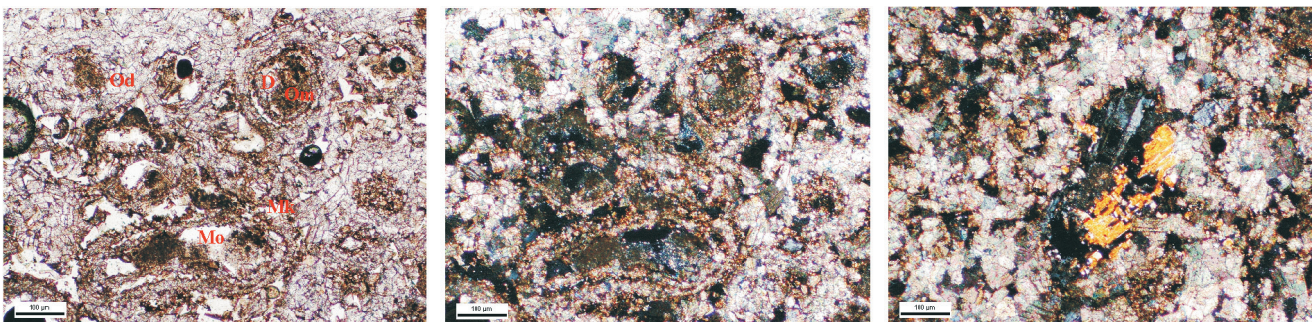
Były to próbki charakteryzujące się porowatością micro-CT w zakresie od 15–22% i przepuszczalnością 29–120 mD. Przykład tego typu skały przedstawiono na rysunkach 1, 2 i 3.

W tej grupie próbek, udział klas porowatości I–III o najmniejszej objętości porów jest bardzo mały, dominuje natomiast klasa VI, która podzielona jest zaledwie na kilka podgrup, bądź stanowi jeden zespół porów. Warunkuje to dobrą komunikację między porami, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach pomierzonych przepuszczalności.

Na podstawie obserwacji petrograficznych stwierdzono, że w badanych próbkach powszechnie występuje

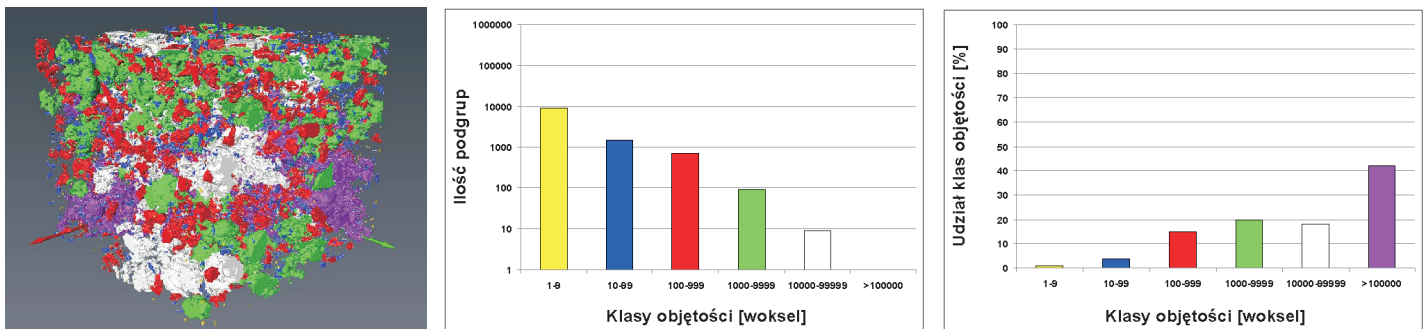
porowatość moldyczna (częściowo zabudowana anhydrytem i halitem) oraz porowatość międzykrystaliczna – związana z neomorfizmem agradacyjnym onkoidów i pierwotną porowatością międzyziarnową. Duże pory związane są z porowatością moldyczną, a ich wielkość dochodzi nawet do 200 mikrometrów; posiadają one także połączenia z innymi porami. Porowatość międzykrystaliczna odgrywa tutaj znaczącą rolę jako połączenia między dużymi porami i – pomimo że średnice porów międzykrystalicznych są znacznie mniejsze (często poniżej 20 mikrometrów) – są one istotnym elementem sieci porowej (rysunek 1).

Taki układ porowatości, obserwowany w szlifach, znajduje swoje odzwierciedlenie w wizualizacjach sieci porowej w obrazie mikrotomograficznym. Obraz najniższych klas objętości sieci porowej (I, II i III) związany jest głównie z istnieniem drobnej porowatości międzykrystalicznej, niewchodzącej w skład dobrze rozbudowanej sieci porowej. Tworzy ona równomiernie rozrzucone pory o nieregularnych kształtach, słabo skomunikowane ze sobą. W dominujących V i VI klasach objętości większe pory połączone są ze sobą systemem kanalików. W klasie V pory połączone są ze sobą kanalikami o średnicy 5-krotnie mniejszej od średnicy porów, podczas gdy w VI klasie

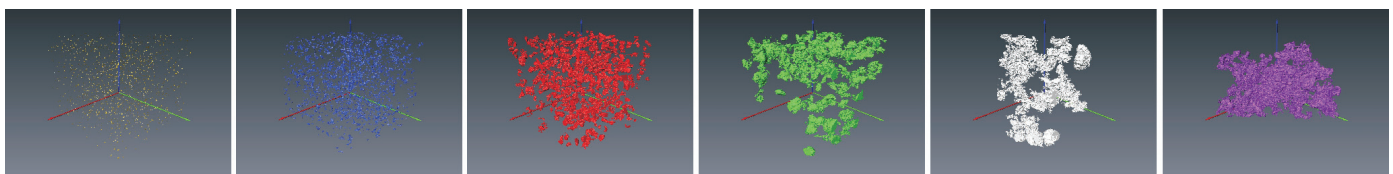


Rys. 1. Charakterystyka mikroskopowa próbki reprezentującej grainstone onkoidowy o dobrych właściwościach zbiornikowych (próbka 9116)

Widoczne silnie zmikrytyzowane onkoidy (Om), których zewnętrzne powłoki uległy dolomityzacji (Od), onkoidy uległy częściowemu rozpuszczeniu, a porowatość moldyczna (Mo) jest częściowo ograniczona cementem dolomitowym (D), anhydrytem i halitem. Widoczna także dobrze rozwinięta porowatość międzykrystaliczna (Mk).



Rys. 2. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki reprezentującej grainstone onkoidowy o dobrych właściwościach zbiornikowych (próbka 9116)



Rys. 3. Przestrzeń porowa próbki 9116, rozłożona na poszczególne klasy objętości

Pory w obrębie próbki są rozłożone równomiernie. W każdej z podpróbek występuje jedynie jeden por, o objętości powyżej 100 000 wokseli.

W podpróbce 9116A stanowi on ok. 40% objętości przestrzeni porowej i pozwala na przepływ płynu przez próbkę w kierunku osi Y, tworząc kanał o skomplikowanym przebiegu. Oprócz niego, istotny wkład w objętość przestrzeni porowej mają także pory o objętościach 100–10 000 wokseli. W podpróbce 9116B objętość przestrzeni porowej stanowią głównie pory o objętościach 100–10 000 wokseli.

Tablica 2. Wyniki pomiaru krętości geometrycznej (wyznaczonej metodą micro-CT) kanalików porowych próbki 9116

| Próbka | Kierunek analizy krętości | Bezwzględna ilość wokseli z tunelu | Względna ilość wokseli z tunelu | Średnia krętość | Maksymalna krętość | Minimalna krętość | Odchylenie standardowe |
|-----------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------------|
| Podpróbka 9116A | X | BRAK | | | | | |
| | Y | 524 | 0,015 | 1,352 | 1,620 | 1,275 | 0,071 |
| | Z | BRAK | | | | | |

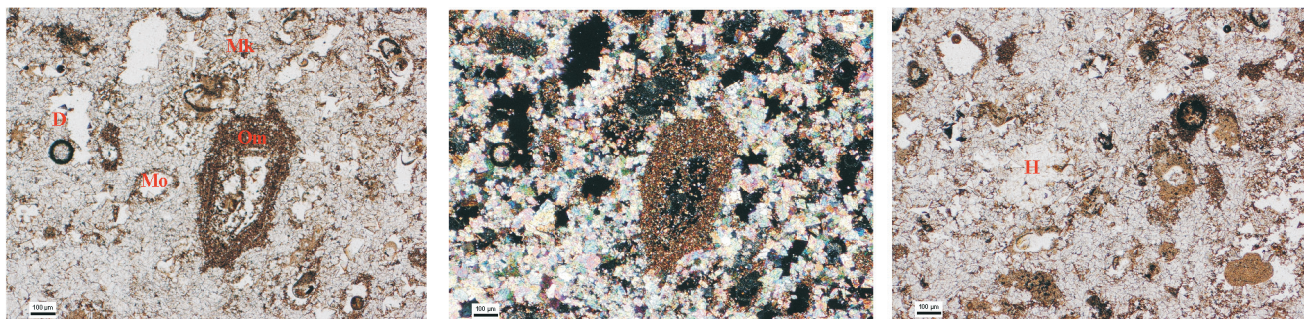
średnica kanalików jest 2-krotnie mniejsza od średnicy porów. Od jednego pora odchodzi do 3 kanalików. Pory mają zróżnicowany kształty: od elipsoidalnych do nieregularnych i są lekko wydłużone.

G02 – grainstone onkoidowy o obniżonej przepuszczalności

Próbki tej grupy charakteryzują się porowatością micro-CT z zakresu 19–27% i przepuszczalnością 0,58–10 mD, a udział najmniejszych klas objętości porowatości jest niewielki. Dominują klasy IV i V, które podzielone są na szereg podgrup, co powoduje, że komunikacja między zespołami jest bardzo utrudniona i przekłada się na niskie wartości przepuszczalności. Przykład tego typu próbek przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6.

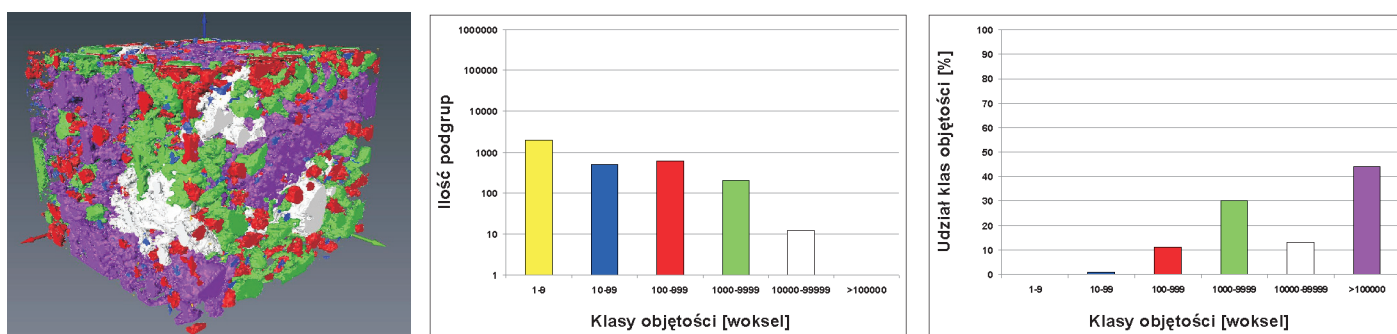
Na podstawie obserwacji petrograficznych stwierdzono, że są to próbki reprezentowane przez grainstone onkoidowe, w których dominuje porowatość moldyczna (po onkoidach), znacznie ograniczona przez cementy (szczególnie halit i anhydryt). W przestrzeni między onkoidami występuje cement bruzdowy i mozaikowy oraz zachowana jest drobna porowatość międzykrystaliczna, która jednak nie stanowi jednorodnej sieci porowej z porowatością moldyczną. Zachowane onkoidy uległy silnemu neomorfizmowi (mikrytyzacji) (rysunek 4).

Obserwacje petrograficzne przekładają się na rozkład porowatości w poszczególnych klasach objętości. Klasy I i II reprezentują rozproszoną (o niewielkim znaczeniu) porowatość międzykrystaliczną. Wyższe klasy objętości związane są z porowatością moldyczną. Na wizualiza-

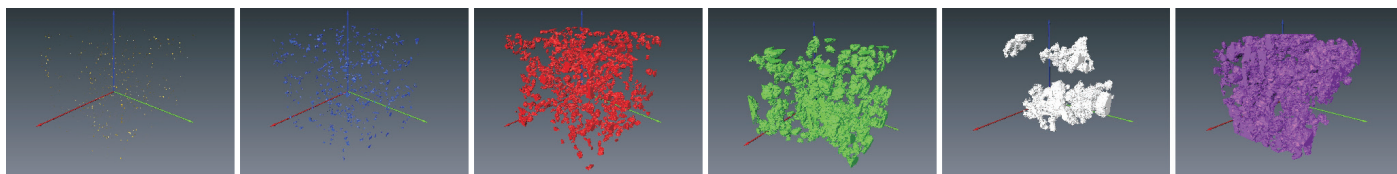


Rys. 4. Charakterystyka mikroskopowa próbki reprezentującej grainstone onkoidowy o obniżonej przepuszczalności (próbka 9112)

Widoczne silnie zmikrytyzowane onkoidy (Om), z zachowaną strukturą wewnętrzną. Częściowo zachowana pierwotna struktura skały. Występuje cement druzdowy i blokowy. Widoczna dobrze rozwinięta porowatość moldyczna (Mo), częściowo zabudowana przez kryształy dolomitu (D) i halitu (H) oraz słabo widoczna porowatość międzykrystaliczna (Mk).



Rys. 5. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki reprezentującej grainstone onkoidowy o obniżonej przepuszczalności (próbka 9112)



Rys. 6. Przestrzeń porowa próbki 9112, rozdzielona na poszczególne klasy objętości

Porowatość w obrębie próbki 9112 jest rozłożona równomiernie. W obydwu podpróbkach dominują pory należące do IV i VI klasy objętości, które zapewniają połączenia pomiędzy przeciwległymi ścianami podpróbek we wszystkich kierunkach. Oprócz tego, istotny wkład do porowatości mają pory klas III i V. Kanały łączące przeciwległe ściany podpróbek są zróżnicowane. W podpróbce 9112A wlot do systemu porów w kierunku Z jest ok. 10 razy mniejszy niż w kierunkach X i Y. Przebieg kanałów w kierunku X jest bardziej skomplikowany niż w kierunkach Y i Z. W podpróbce 9112B wlot do systemu porów w kierunku X jest prawie dwa razy większy niż w kierunkach Y i Z. Krętość kanałów w kierunkach X i Y jest zbliżona, zaś w kierunku osi Z kanały mają bardziej skomplikowany przebieg.

Tablica 3. Wyniki pomiaru krętości geometrycznej (wyznaczonej metodą micro-CT) kanałków porowych próbki 9112

| Próbka | Kierunek analizy krętości | Bezwzględna ilość wokseli z tunelu | Względna ilość wokseli z tunelu | Średnia krętość | Maksymalna krętość | Minimalna krętość | Odchylenie standardowe |
|-----------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------------|
| Podpróbka 9112A | X | 3921 | 0,111 | 2,051 | 2,781 | 1,658 | 0,257 |
| | Y | 2999 | 0,085 | 1,427 | 1,609 | 1,184 | 0,085 |
| | Z | 275 | 0,007 | 1,586 | 1,964 | 1,429 | 0,173 |
| Podpróbka 9112B | X | 4488 | 0,128 | 1,806 | 2,477 | 1,452 | 0,243 |
| | Y | 2419 | 0,069 | 1,604 | 1,992 | 1,278 | 0,204 |
| | Z | 2402 | 0,060 | 2,237 | 2,615 | 1,903 | 0,135 |

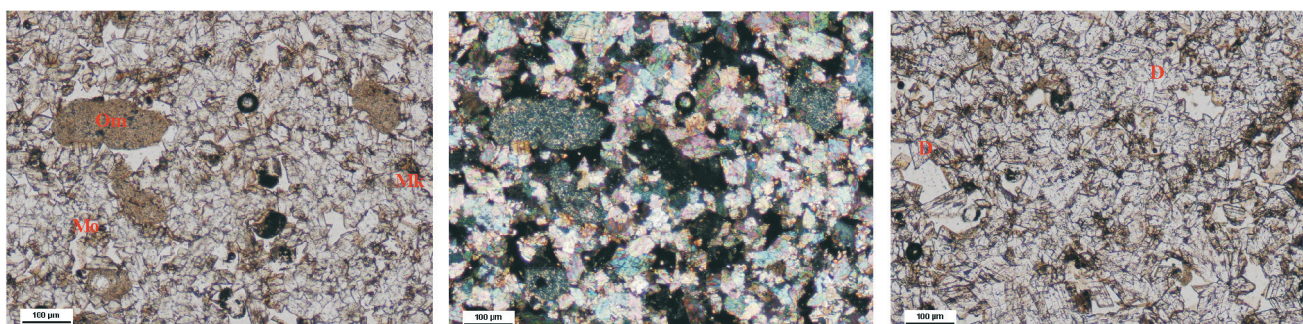
W ciałach klas II, IV, V i VI widoczne są duże elipsoidalne pory o średnicach dochodzących do 100 μm , połączone kanałkami o średnicach 2–3-krotnie mniejszych, jednak nie tworzą one zwartych zespołów lecz są podzielone na liczne podgrupy. Jest to spowodowane występowaniem znacznej ilości cementu halitowego – ograniczającego przepuszczalność, przy zachowaniu dużej porowatości.

GO3 – grainstone onkoidowy o obniżonej porowatości

Próbki tej grupy charakteryzują się porowatością micro-CT z zakresu 11–12%, a pomiary przepuszczalności dają

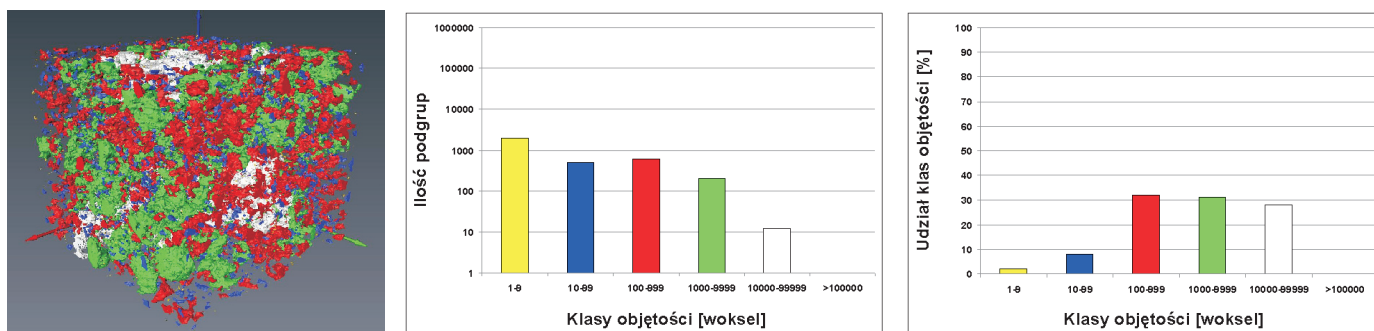
wartości w zakresie od 1–66 mD. W badanych próbkach nie występuje najwyższa (VI) klasa objętości, a dominuje klasa V, podzielona na ok. 10 podgrup – co daje dobrą przepuszczalność. Udział najniższych klas objętości (I i II) jest bardzo mały (rysunki 7, 8 i 9).

Na podstawie obserwacji petrograficznych stwierdzono, że są to skały bardzo podobne do grupy GO2 (grainstone onkoidowe), o częściowo zatartej pierwotnej strukturze skały (przez procesy mikrystyzacji onkoidów oraz dolomityzację całej skały). Miejskami, jedynie na podstawie koncentrycznego ułożenia kryształów, można wnioskować o pierwotnej strukturze skały, która prawdopodobnie ce-

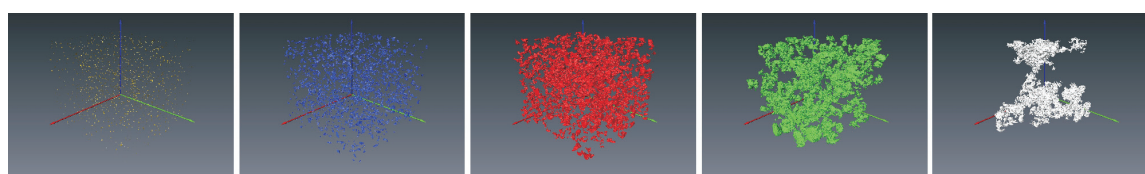


Rys. 7. Charakterystyka mikroskopowa próbki reprezentującej grainstone onkoidowy o obniżonej porowatości (próbka 9127)

Widoczne silnie zmikrytyzowane i zdolomityzowane onkoidy (Om), z zatartą strukturą wewnętrzną. Częściowo zachowana pierwotna struktura skały. Występuje cement druzdowy i blokowy. Widoczna porowatość moldyczna – (Mo) częściowo zabudowana przez cement dolomitowy – oraz drobna porowatość międzykrystaliczna (Mk).



Rys. 8. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki reprezentującej grainstone onkoidowy o obniżonej porowatości (próbka 9127)



Rys. 9. Przestrzeń porowa próbki 9127, rozłożona na poszczególne klasy objętości

Porowatość próbki 9127 jest jednolita. W obydwu podpróbkach największy udział w objętości przestrzeni porowej mają pory z klas od III do V. Istotny jest także udział porów z klasy II. Nie występują pory zapewniające połączenia pomiędzy przeciwległymi ścianami podpróbek.

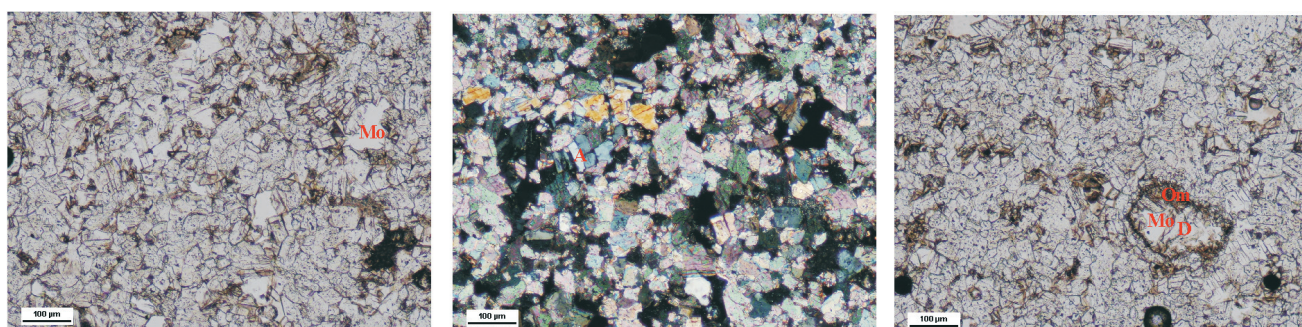
chowała się znaczną porowatością moldyczną (powyżej 20%), jednak została ona znacznie zredukowana przez procesy dolomityzacji i cementacji anhydrytem. Wraz ze zredukowaną porowatością moldyczną występuje też porowatość międzykrystaliczna w obrębie cementu bruzdowego, jednak nie stanowi ona zwartej sieci porowatości (rysunek 7).

Niskie klasy objętości (I i II) reprezentują porowatość międzykrystaliczną nie mającą komunikacji z porowatością typu moldycznego, występującą w wyższych klasach objętości (III, IV i V). Wyższe klasy charakteryzują się występowaniem nieregularnych porów, o postrzępionych granicach, podzielonych na szereg mniejszych „podporów”

i połączonych wąskimi kanalikami. Szczególnie wyraźnie widoczne jest to w V klasie objętości. Obraz porowatości jest związany z intensywną cementacją porowatości moldyczej.

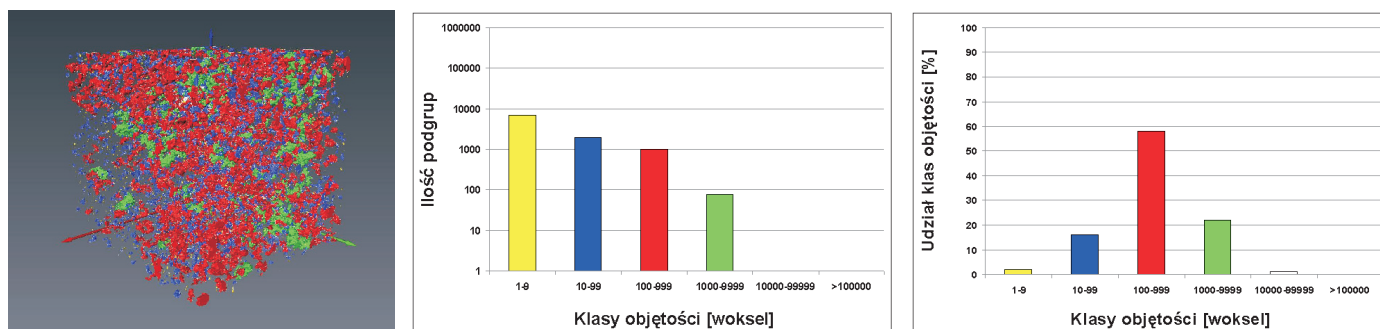
DK – dolomit krystaliczny o złych właściwościach zbiornikowych

Ta grupa próbek cechowała się porowatością micro-CT 0,1–6% i przepuszczalnością 0,02–53 mD. Dominowała III klasa objętości porowatości. Stanowiły ją wydłużone pory, połączone ze sobą kanalikami o średnicy 2–3-krotnie mniejszej od średnicy porów. Do jednego pora dochodziło

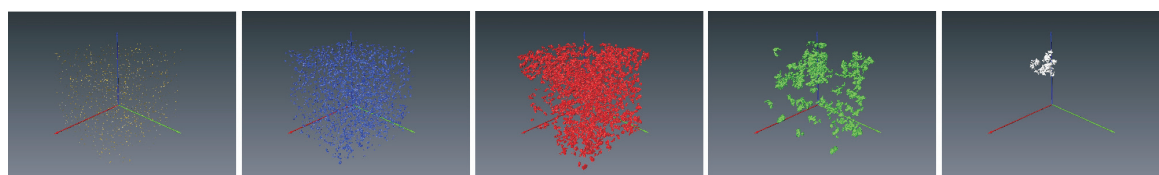


Rys. 10. Charakterystyka mikroskopowa próbki reprezentującej dolomit krystaliczny o złych właściwościach zbiornikowych (próbka 9108)

Dolomit krystaliczny silnie scementowany. Pierwotna struktura została zatarta. Miejscami widoczne ślady po onkoidach, pozbawione wewnętrznej struktury przez procesy neomorfizmu (mikrytyzacja) (Om). Porowatość moldyczna (Mo) znacznie ograniczona przez cement dolomitowy (D) i anhydrytowy (A).



Rys. 11. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki reprezentującej dolomit krystaliczny o złych właściwościach zbiornikowych (próbka 9108)



Rys. 12. Przestrzeń porowa próbki 9108, rozłożona na poszczególne klasy objętości

Porowatość próbki jest jednorodna. W obydwu podpróbkach występują pory o objętości nie większej niż 99 999 wokseli. Największy udział w objętości przestrzeni porowej mają pory o objętościach w zakresie 100–999 wokseli. Oprócz nich istotny udział w objętości mają pory o objętościach 10–99 oraz 1 000–99 999 wokseli. Nie występują połączenia pomiędzy przeciwległymi ścianami podpróbek.

do 3 kanalików. Klasa III nie tworzyła zwartej sieci porów i była podzielona na szereg podgrup, co w efekcie determinowało niską przepuszczalność. Klasy VI i V występowały lokalnie i nie tworzyły istotnego elementu sieci porowej (rysunki 10, 11 i 12).

Petrograficznie są to dolomity krystaliczne oraz grainstoney onkoidowe silnie scementowane, charakteryzujące się bardzo źle zachowaną porowatością moldyczną, wypełnioną cementem dolomitowym. Powszechnie występował cement anhydrytowy i halit. Pomiedzy zachowanymi śladami onkoidów występował cement o charakterze mozaikowym, który praktycznie całkowicie blokował porowatość. Występowała także bardzo drobna porowatość międzykrystaliczna (rysunek 10).

Obraz rozkładu porowatości w wyższych klasach (III, IV i V) związany jest z istnieniem słabo zachowanej porowatości moldyczej, która została silnie zredukowana przez cementację. Dodatkowo, przestrzeń między onkoidami wypełniona była przez drobnokrystaliczny dolomit i tylko miejscami zachowała się drobna porowatość międzykrystaliczna – widoczna na obrazach I i II klasy objętości porowatości.

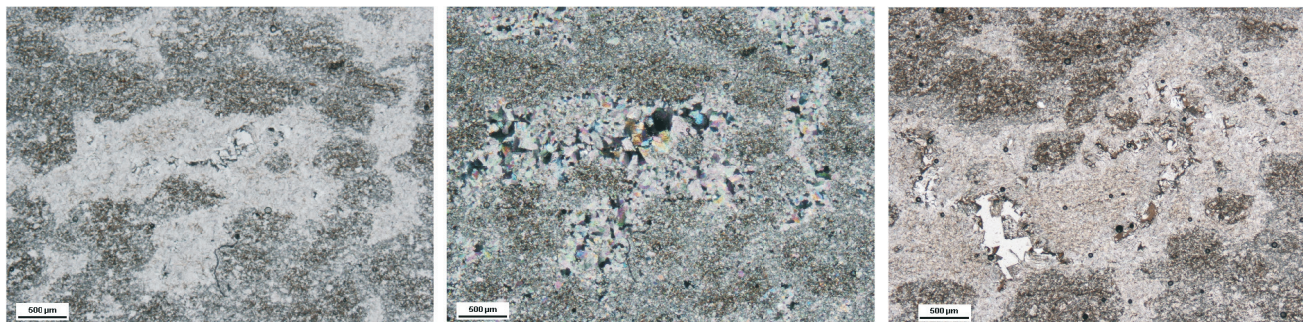
DF – dolomit o bardzo złych właściwościach zbiornikowych

Do tej grupy należały tylko dwie próbki, charakteryzujące się porowatością micro-CT 0,1–0,9% i przepuszczal-

nością poniżej 1 mD. Dominowały niskie klasy objętości (I, II i III), a nie występowały klasy V i VI. Wszystkie klasy podzielone są na liczne podgrupy, co powodowało, że bardzo niska porowatość szła w parze z bardzo niską przepuszczalnością (rysunki 13, 14 i 15).

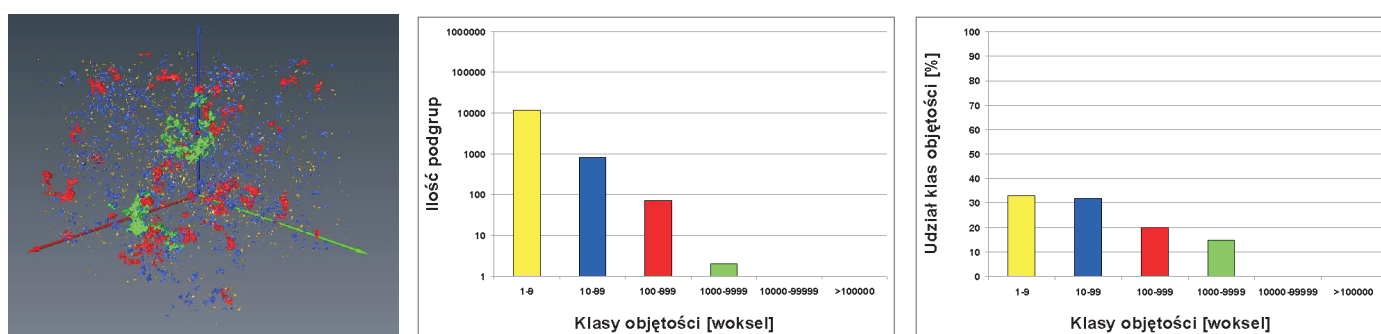
Na podstawie obserwacji petrograficznych stwierdzono, że próbka 9129 to dolomit krystaliczny, a próbka 9139 jest przykładem dolomitu o strukturze fenestralnej (rysunek 13). W próbce 9129 (dolomit krystaliczny) zachowały się ślady po onkoidach oraz bardzo drobna porowatość międzykrystaliczna. Nie zachowała się porowatość moldyczna. Onkoidy są silnie wypełnione cementem dolomitowym, często też występują cementy anhydrytowe. W próbce 9139 porowatość ma charakter fenestralny, czyli charakteryzuje się występowaniem równoległych, miejscami nieregularnych horyzontów porowatości, związanych z występowaniem maty glonowej. W opisywanej próbce, pierwotnie duża porowatość została intensywnie zabudowana przez cement kalcytowy o charakterze palisadowym. Pory mają ze sobą ograniczone połączenia i nie stanowią zwartej sieci.

Dominacja najniższych klas objętości (I i II) w próbkach idzie w parze z bardzo niskimi właściwościami zbiornikowymi skał oraz intensywnością procesów diagenetycznych. Obraz III klasy objętości porowatości w próbce 9129 jest odzwierciedleniem zachowania szczątkowej porowatości moldyczej. Połączenia między porami praktycznie nie istnieją – są to jedynie odseparowane od siebie pory,

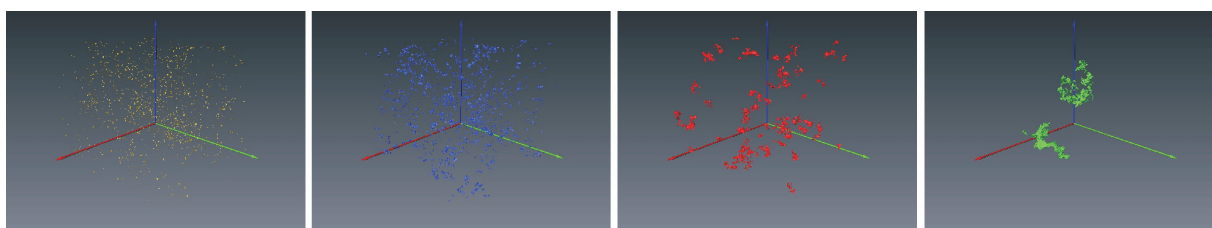


Rys.13. Charakterystyka mikroskopowa próbki reprezentującej dolomit o bardzo złych właściwościach zbiornikowych (próbka 9139)

Dolomit o teksturze fenestralnej. Słabo zachowana porowatość międzykrystaliczna (Mk). W próbce widoczne są nagromadzenia substancji organicznej (Or) oraz ślady po rozpuszczaniu skorupki (Sk).



Rys. 14. Charakterystyka mikrotomograficzna próbki reprezentującej dolomit o bardzo złych właściwościach zbiornikowych (próbka 9139)



Rys. 15. Przestrzeń porowa próbki 9139, rozłożona na poszczególne klasy objętości

Próbka charakteryzuje się niejednorodną porowatością. W obydwu podpróbkach występują jedynie pory o objętościach niższych od 10 000 wokseli. W podpróbce 9139A, o nieznacznie niższej porowatości, dominują pory o objętościach 1–99 wokseli. W podpróbce B największy udział w porowatości mają pory o objętościach 10–999 wokseli. Znacznie niższy jest udział porów o objętości powyżej 999 wokseli.

nieprzekraczające kilkudziesięciu mikrometrów. Próbka 9139 ma zupełnie inną charakterystykę mikrofacjalną, jednak charakteryzuje się bardzo zbliżonymi właściwościami zbiornikowymi. Pierwotna, prawdopodobnie znaczna porowatość fenestralna została zredukowana przez

cementację. Zachowała się ona w postaci nieregularnie rozrzuconych zespołów porów III i IV klasy objętości. Są one podzielone na liczne podgrupy, co pomimo braku wartości przepuszczalności daje podstawę do stwierdzenia, że skała charakteryzuje się złą przepuszczalnością.

Podsumowanie

Bazując na 23 próbkach, reprezentujących poziom dolomitu głównego, wykonano obserwacje petrograficzne płytek cienkich, badania porowatości z wykorzystaniem mikrotomografii rentgenowskiej oraz badania przepusz-

czalności. Na podstawie przeprowadzonych analiz, próbki podzielono na pięć typów skał zbiornikowych:

- GO1 – grainstone onkoidowy o dobrych właściwościach zbiornikowych,

- GO2 – grainstone onkoidowy o obniżonej przepuszczalności,
- GO3 – grainstone onkoidowy o obniżonej porowatości,
- DK – dolomit krystaliczny o złych właściwościach zbiornikowych,
- DF – dolomity o bardzo złych właściwościach zbiornikowych.

Interpretacja dystrybucji porowatości (na podstawie wykresów udziału klas objętości porów – składających się na całkowitą porowatość) oraz wizualizacja 3D przestrzeni porowej została uzupełniona obserwacjami petrograficznymi. Jest to niezbędny krok dla kalibracji wyników obserwowanych na wizualizacjach trójwymiarowych obrazów micro-CT [2, 4]. Spójna analiza petrograficzna i wyników z mikrotomografu pozwoliła stwierdzić, że:

- klasa I i II obrazuje rozkład porowatości międzykrystalicznej: drobnej, nieregularnej, rozmieszczonej chaotycznie w masie próbki, nie mającej powiązania z innymi typami porowatości,
- w wyższych klasach (III–VI) decydującą rolę w sieci porowej zaczyna odgrywać porowatość moldyczna. O ile klasa III charakteryzuje się jeszcze regularnym rozkładem porowatości, tak we wszystkich próbkach klasy IV, V i VI rozkład sieci porowej cechuje nieregularność i znaczna zmienność pomiędzy poszczególnymi próbkami,
- w wyższych klasach porowatości generalnie zwiększają się wielkości porów oraz ilość połączeń pomiędzy nimi, a zmienna pozostaje szerokość kanałów łączących pory (w stosunku do średnicy porów). Prawdopodobnie te ostatnie czynniki (ilość kanałów łączących pory oraz ich szerokość), a nie sama wartość współczynnika porowatości, ostatecznie determinują właściwości zbiornikowe [5],
- obecność i dominacja VI klasy objętości świadczy o dobrze zachowanej porowatości moldycznej, współ-

występującej z dobrze rozwiniętą porowatością międzykrystaliczną, związaną głównie z neomorfizmem agradacyjnym onkoidów – co determinuje wysoką porowatość i przepuszczalność (grupa GO1),

- przesunięcie dominanty do niższych klas pokazuje trend pogarszania się właściwości zbiornikowych; poprzez redukcję porowatości oraz połączeń pomiędzy poszczególnymi zespołami porów,
- wraz ze wzrostem ilości cementów właściwości zbiornikowe ulegają obniżeniu, a dominanty na wykresach udziału klas objętości porów przesuwały się ku coraz niższym wartościom. Początkowo redukcji ulega jedynie przepuszczalność (grupa GO2), a następnie także porowatość (grupa GO3), aż do wystąpienia bardzo niskich właściwości zbiornikowych (grupy DK i DF),
- wzrost intensywności cementacji oraz stopnia przeobrażenia skał powoduje większą defragmentację sieci porowej (podział na większą ilość podgrup), co w zasadniczy sposób wpływa na wartości przepuszczalności,
- w badanych próbkach wzrost porowatości nie prowadzi do wzrostu przepuszczalności, ponieważ decydującą rolę odgrywają połączenia między porami,
- w analizowanych próbkach brak było porowatości o charakterze szczelinowym; nie została ona zaobserwowana ani w szlifach, ani na mikrotomograficznych wizualizacjach 3D.

Wykonane analizy wskazują na znaczną użyteczność mikrotomografii rentgenowskiej dla określenia właściwości zbiornikowych skał węglanowych i pozwalają na jakościową oraz ilościową ocenę dystrybucji porów – opartą nie na jednostkowym pomiarze porowatości, jak w przypadku standardowych metod laboratoryjnych, ale na analizie obrazu 3D wygenerowanego na podstawie trzech tysięcy radiogramów próbki, z dokładnością równą rozdzielczości obrazu, czyli 1 woksela ($216 \mu\text{m}^3$).

Artykuł nadesłano do Redakcji 30.03.2010 r. Przyjęto do druku 18.05.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Arns C.H., Bauget F., Ghous A., Sakellariou A., Senden T.J., Sheppard A.P., Sok R.M., Pinczewski W.V., Kelly J.C., Knackstedt M.A.: *Digital Core Laboratory: Petrophysical Analysis from 3D Imaging of Reservoir Core Fragments*. Petrophysics, vol. 46, no. 4, p. 260–277, 2005.
- [2] Foubert A., Swennen R., Long H., Dewit J., Pauwels B.: *The use of high-resolution 3D X-ray microtomography in carbonate reservoir studies*. SkyScan User Meeting (streszczenie), 2009.
- [3] Koehrer B.S., Heymann C., Prousa F., Aigner T.: *Multiple-scale facies and reservoir quality variations within a dolomite body – Outcrop analog study from the Middle Triassic, SW German Basin*. Marine and Petroleum Geology 27, 386–411, 2010.
- [4] Remeysen K., Swennen R.: *Application of microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: possibilities and limitations*. Marine and Petroleum Geology, 25, 486–499, 2008.
- [5] Smosna R., Bruner K.R.: *Pore Geometry and Permeability in a Dolomite Reservoir*. AAPG Eastern Section Meeting (streszczenie), Pittsburgh, PA, September 6–10, 2003.
- [6] Sun S.Q.: *Dolomite Reservoirs: Porosity Evolution and Re-*

servoir Characteristics. AAPG Bulletin, no. 79, p. 186–204, 1995.

[7] Zalewska J., Dohnalik M., Poszytek A.: *Wizualizacja i ana-*

liza przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Prace INiG nr 161, Kraków, 2009.



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. Autorka 110 publikacji.



Mgr Jan KACZMARCZYK – absolwent Wydziału Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego na specjalności Kataliza i chemia powierzchni ciała stałego. Pracuje w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG. Zajmuje się badaniami metodą mikrotomografii rentgenowskiej, komputerowym przetwarzaniem i analizą obrazu oraz symulacjami numerycznymi.



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.



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 Złóż, kontynuując tematykę badawczą.

ZAKŁAD GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Zakres działania:

- trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT);
- określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek skał i kamienia cementowego metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR);
- 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, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- interpretacja profilowań geofizycznych w zakresie oceny stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach wiertniczych;
- wyznaczanie kategorii zwiercalności skał na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej, w korelacji z fizyko-mechanicznymi i sprężystymi właściwościami rdzeni wiertniczych.

Kierownik: mgr inż. Jadwiga Zalewska

Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

Telefon: 12 653-25-12 wew. 132 lub 165

Faks: 12 650-67-70, 12 653-16-65

E-mail: jadwiga.zalewska@inig.pl

