

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik, Jan Kaczmarczyk  
*Instytut Nafty i Gazu, Kraków*

Mateusz Masłowski, Elżbieta Biały  
*Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno*

## Wizualizacja kanalików robaczkowych, wywołanych zabiegiem kwasowania rdzeni wiertniczych, uzyskana metodą mikrotomografii rentgenowskiej

### Wstęp

Kwasowanie matrycowe zbiorników ropy naftowej jest procesem projektowanym w celu poprawienia produktywności otworu poprzez zwiększenie przepuszczalności skały w rejonie otaczającym otwór wiertniczy [2].

Powszechnie stosowana technika stymulacji wiąże się z zatłaczaniem kwasu do utworów węglanowych, który rozpuszcza pewną ilość materiału szkieletu formacji skalnej i tworzy kanały przepływu, zwiększające przepuszczalność szkieletu skalnego.

Według Williams i in. [7] żadne badania teoretyczne ani eksperymentalne nie pozwalają przewidywać ilości, wielkości, czy też długości kanalików robaczkowych. Jeżeli reakcja kwasu ze skałą jest bardzo szybka, teorie przewidują, że zostanie utworzona tylko niewielka liczba tych kanalików. Niska szybkość reakcji sprzyja tworzeniu się szeregu kanalików robaczkowych o małej średnicy. Nierode i Williams [3] wykazali, że maksymalna długość kanalika robaczkowego zmienia się od kilku cali do kilku stóp, a jego długość może być znacznie zwiększona poprzez zmniejszanie szybkości strat płynu z kanalika do formacji.

Obecnie nie istnieją ustalone metody oceny inicjowania i rozwoju kanalików robaczkowych wewnątrz skał. Podejście niszczące do oceny tych kanalików wewnątrz

próbek rdzeniowych poddawanych kwasowaniu wiąże się z zatłaczaniem stopu Wooda poprzez utworzony kanalik, a następnie rozpuszczaniu matrycy węglanowej kwasem, w celu zbadania kształtu kanalika robaczkowego zachowanego przez stop Wooda [4]. Metoda ta jest stosowana także w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu [1].

Jednak najbardziej skutecznym i pomocnym narzędziem w określaniu kanalików robaczkowych okazuje się być metoda mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT). Ponieważ jest to technika nieniszcząca, umożliwia ona scharakteryzowanie rdzenia przed i po eksperymencie stymulacji, dzięki czemu możliwe jest dokonanie oceny rozwoju i kształtu kanalików robaczkowych.

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa jest techniką eksperymentalną, generującą trójwymiarowy obraz przestrzeni porowej wewnątrz badanej próbki skały. Technika ta umożliwia „prześwietlenie” próbki i trójwymiarowe przedstawienie obrazu przestrzeni wewnętrznej skały. W metodzie tej wykorzystuje się różnice we własnościach absorpcyjnych materiałów, które – w zależności od składu mineralnego – w różny sposób pochłaniają promieniowanie rentgenowskie.

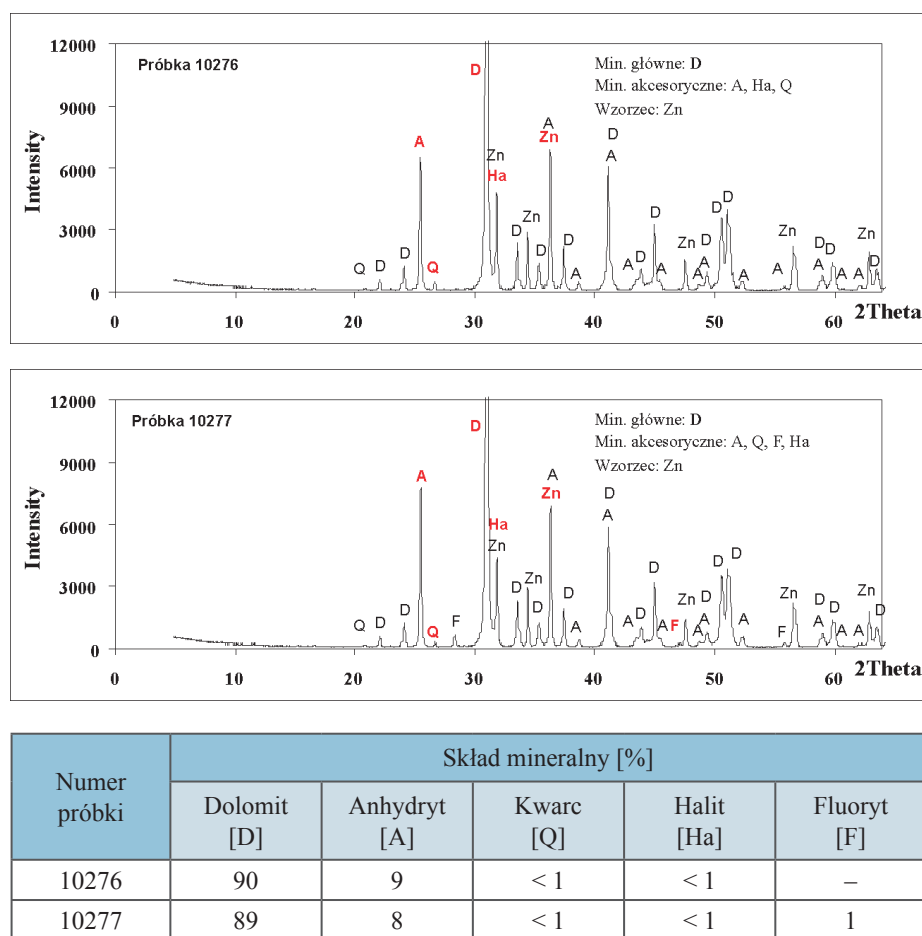
### Material badawczy

Material badawczy stanowiły dwie próbki skał węglanowych (10276 i 10277), których skład mineralny

określono na podstawie interpretacji dyfraktogramów rentgenowskich. Oceniono, że pod względem mineralogicznym

obydwie próbki mają praktycznie jednakowy skład, gdzie dominującym minerałem był dolomit, minerałem akceso-

rycznym – anhydryt, a pozostałe składniki występowały w ilościach śladowych (rysunek 1).



Rys. 1. Ocena składu mineralnego próbek skał węglanowych na podstawie interpretacji dyfraktogramów rentgenowskich

### Metodyka prowadzenia badań

W pierwszej kolejności przeprowadzono skanowanie próbek mikrotomografem rentgenowskim Benchtop 160CT z geometrią wiązki stożkowej. Aparat składa się z trzech podstawowych elementów: źródła promieniowania rentgenowskiego, manipulatora (stolik obrotowy, na którym umieszczana jest próbka) oraz detektora czulego na promieniowanie rentgenowskie, który rejestruje tłumienie promieniowania X w obrębie próbki. W miarę jak próbka stopniowo obraca się na manipulatorze o pełny obrót (360°), detektor zapisuje serie radiogramów (ok. 3000), a odpowiedni program komputerowy zestawia cyfrowe dane rzutowania, które następnie zostają poddane rekonstrukcji, w celu wizualizacji wewnętrznej struktury próbki. Zasada tej techniki obrazowania opisana jest m.in. przez Wellington i Vinegar [6] oraz Van Geet i in. [5].

W badaniu tym skany micro-CT wykonano przy napięciu lampy rentgenowskiej 130 kV i natężeniu prądu

91  $\mu$ A. Manipulator pomiędzy kolejnymi rzutowaniami był obracany o 0,12°, a czas skanowania dla jednej próbki wynosił około 4 godzin. Więcej szczegółów na temat prowadzenia badań można znaleźć w pracy Zalewska i in. [8].

Następnie próbki poddano kwasowaniu na stanowisku badawczym do laboratoryjnych symulacji kwasowania na rdzeniach naturalnych, z systemem tłoczenia kwasów (*Acid Delivery System*), pozwalającym na wykonywanie badań przepływowych typu *core flow*.

Procedura kwasowania przebiegała następująco: próbkę rdzeniową nasycano 2% roztworem  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , a następnie przetłaczano mieszaninę kwasową z odpowiednim wydatkiem, przy przeciwności równym 2 MPa.

Próbkę oznaczoną numerem 10276 kwasowano płynem o składzie: 15%  $\text{HCl}$  + 0,2% inhibitora korozji, z wydatkiem 2 ml/min. Przez rdzeń przetłoczono 11,74 ml kwasu.

Próbkę oznaczoną numerem 10277 kwasowano płynem

o tym samym składzie, zwiększając wydatek do 3 ml/min. W tym przypadku przez rdzeń przetłoczono 9,5 ml kwasu. Testy wykonano w temperaturze 60°C.

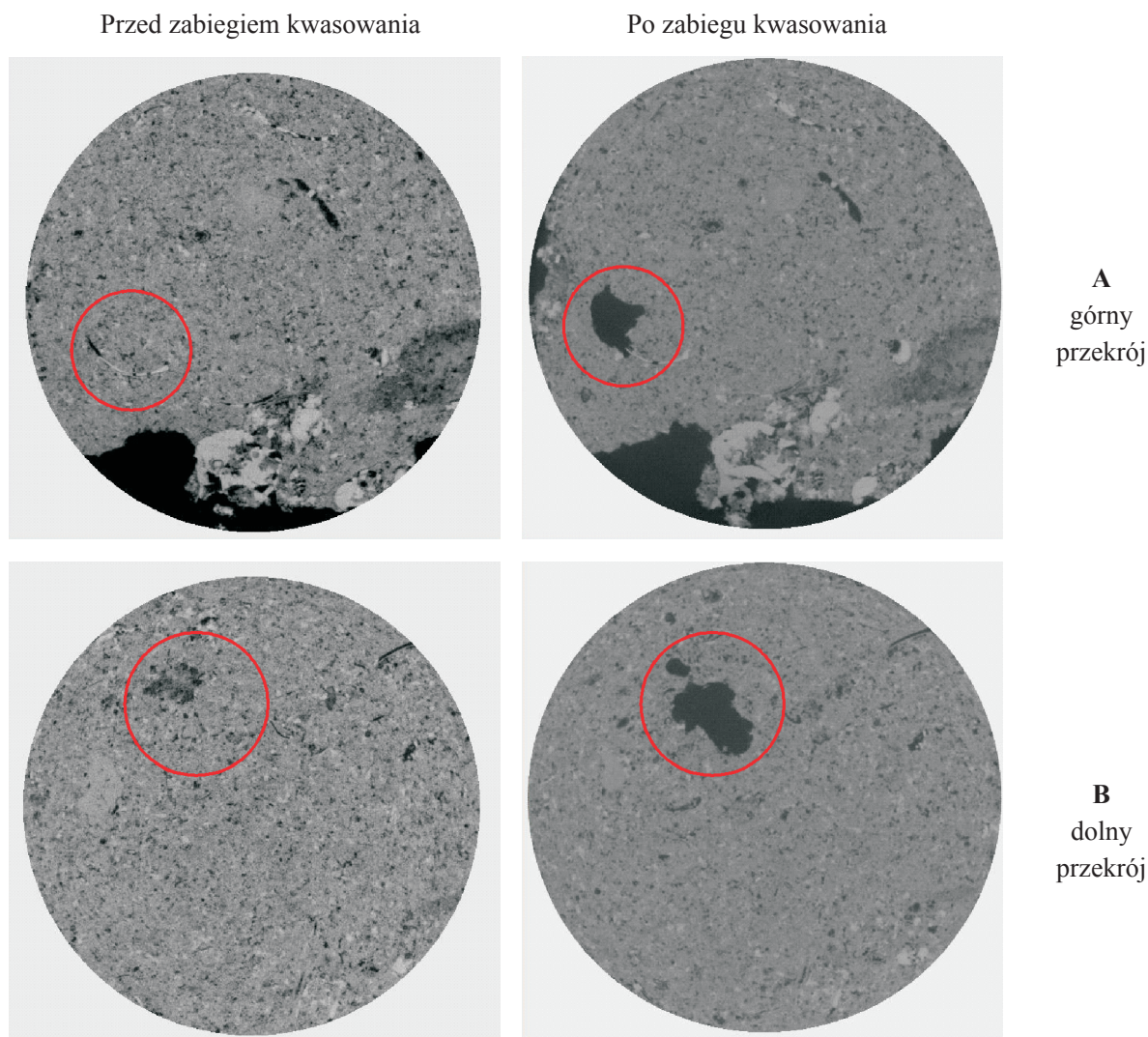
Po zatłoczeniu wymaganej objętości kwasu, próbki ponownie poddano badaniu mikrotomograficznemu, przy zachowaniu tych samych co poprzednio parametrów pomiaru.

### Otrzymane wyniki

W pierwszej kolejności przedstawiono porównanie przekroi (plastrów) wewnętrznej struktury próbki przed i po zatłoczeniu kwasu, co zilustrowano na rysunkach 2 i 3. Przekroje obrazują ten sam fragment próbki przed i po zabiegu kwasowania. Część A przedstawia przekrój górny, natomiast część B – przekrój dolny próbek (rysunki 2 i 3).

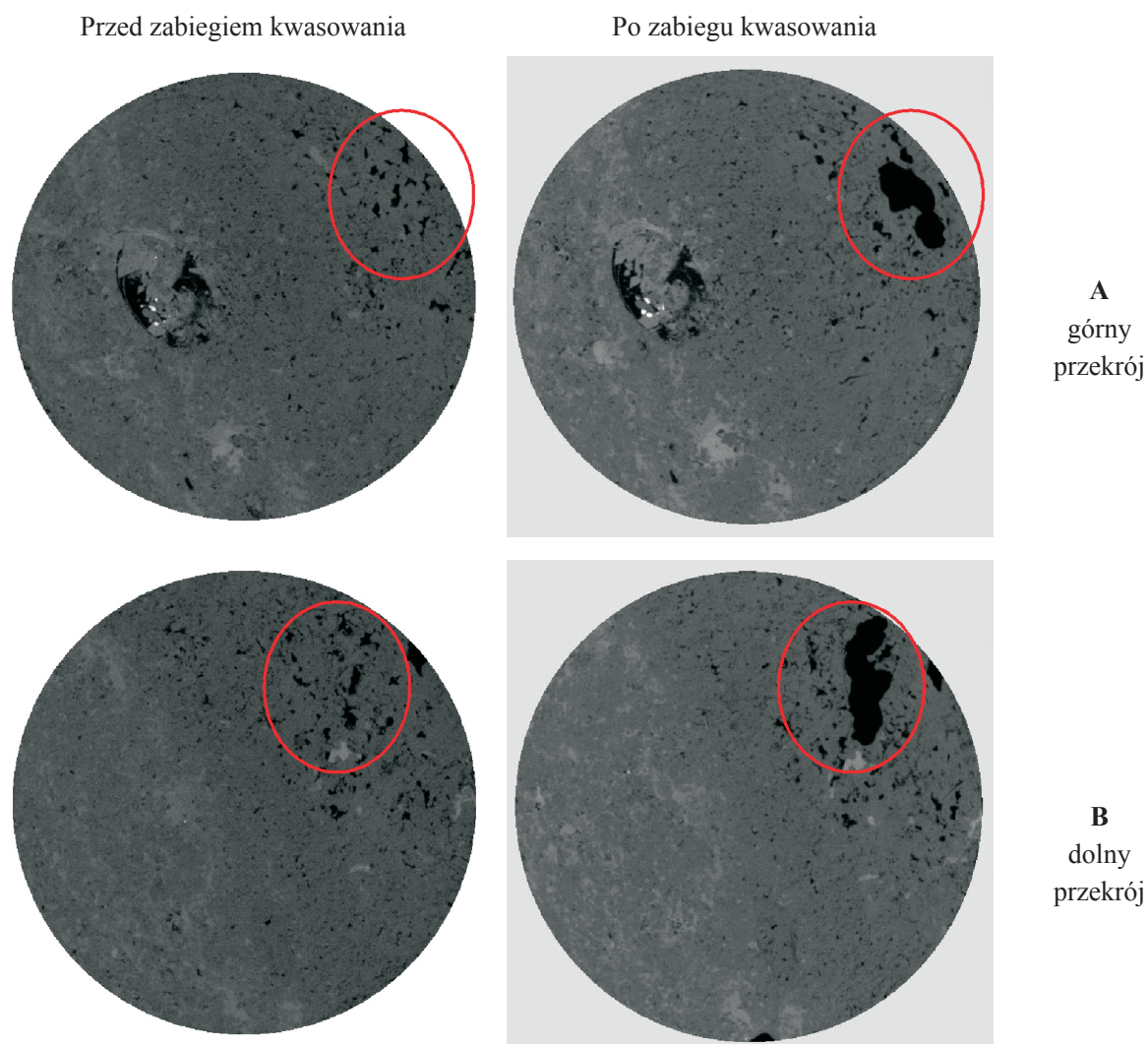
Jak wynika z rysunków 2 i 3, ilustrujących umiejscowienie kanałika robaczkowego wewnątrz próbek rdzeniowych, po zabiegu kwasowania nastąpił wyraźny wzrost

powierzchni porów (zaznaczonych kolorem czarnym w czerwonej obwódce). Kanałik robaczkowy, widoczny na wszystkich obrazach po prawej stronie, jest w pełni rozwinięty. Wnętrze powstałego kanałika jest fascynujące i niemożliwe do przedstawienia w formie „obrazka na papierze”, ale można go zobaczyć w wersji trójwymiarowego filmu na stronie internetowej Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu, pod adresem: <http://www.inig.pl/ZD/images/sw/video/sw-microCT.html>.



Rys. 2. Obrazy przekrojów 2D próbki rdzeniowej (10276): przed rozpoczęciem zatłaczania kwasu (po lewej stronie) i po zakończeniu tego procesu (po stronie prawej)





Rys. 3. Obrazy przekrojów 2D próbki rdzeniowej (10277): przed rozpoczęciem zatłaczania kwasu (po lewej stronie) i po zakończeniu tego procesu (po stronie prawej)

#### **Wizualizacja zmian objętości struktury porowej**

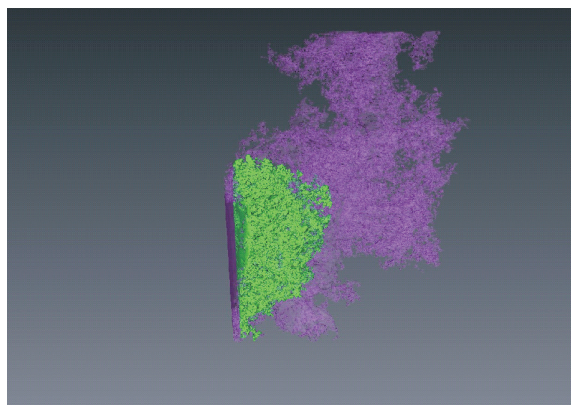
Dalsza interpretacja danych micro-CT obejmowała analizę jakościową i ilościową, w oparciu o wygenerowane trójwymiarowe filmy. Najpierw wykonano przestrzenną wizualizację pierwotnej struktury całej skały, a następnie przeprowadzono analizę rozkładu porowatości, która bazowała na podziale sieci porowej na podgrupy. Każda z podgrup to zespół porów połączonych ze sobą, lecz nieskomunikowanych z innymi podgrupami. Sposób podziału struktury porowej na klasy objętości zaprezentowano w tabelicy 1.

Na rysunku 4 przedstawiono rozwój przestrzeni porowej, poprzez porównanie dwóch największych podtypów struktury porów dla każdej próbki – przed i po procesie kwasowania. W próbce 10276 nastąpił bardzo wyraźny wzrost największego obiektu klasy VI; stan przed zabiegiem kwasowania oznaczono kolorem zielonym, stan po tym procesie – kolorem półprzeźroczystym fioletowym. W próbce 10277 wystąpił mniej uchwytany wzrost porów klasy VI, a ich zmiana była trudna do zwizualizowania, dlatego też rysunek 4B przedstawia porównanie próbek na dwóch obrazach.

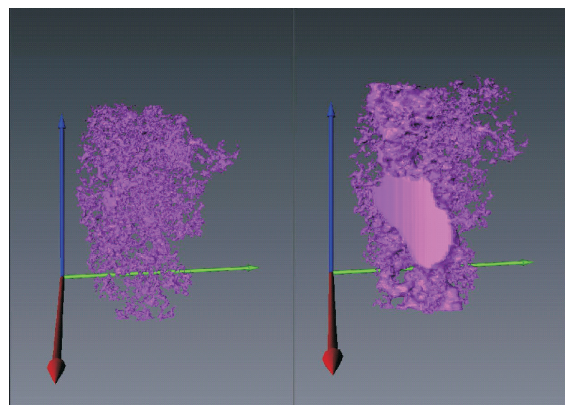
Tablica 1. Sposób podziału struktury porowej na klasy objętości

Objętość poru [woksel]	1–9	10–99	100–999	1000–9999	10 000–99 999	> 100 000
Objętość poru [ $\mu\text{m}^3$ ]	$2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$ – $2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$ – $2 \cdot 10^7$	$> 2 \cdot 10^7$
Klasa	I	II	III	IV	V	VI
Kolor	Żółty	Niebieski	Czerwony	Zielony	Biały	Fioletowy

A) Próbką 10276



B) Próbką 10277



Rys. 4. Wizualizacja przestrzenna zmian objętości struktury porowej próbek

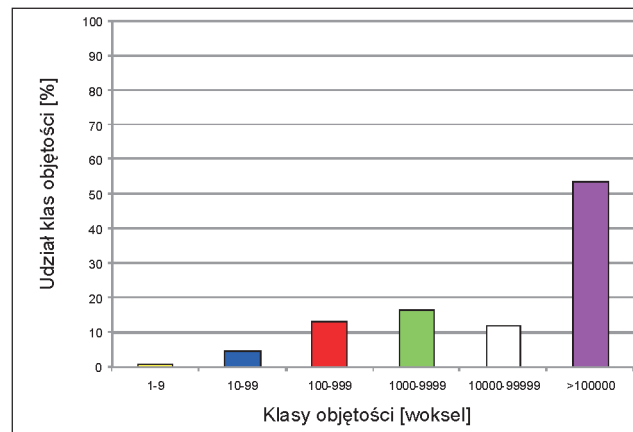
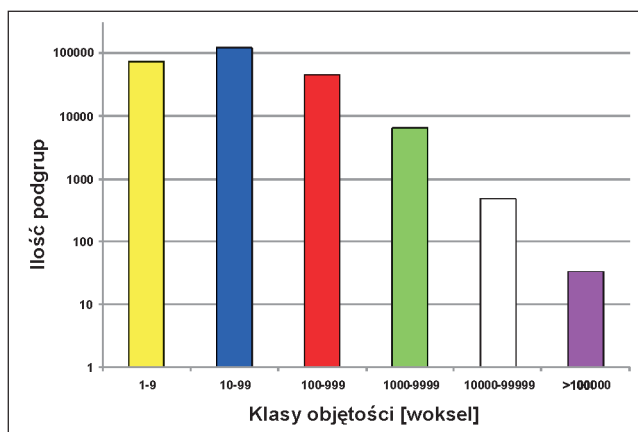
**Analiza ilościowa zmian objętości struktury porowej**

Analiza ilościowa przestrzeni porowej badanych próbek na podstawie danych micro-CT prowadzona była przy zastosowaniu programu MAVI. Zrekonstruowaną strukturę wewnętrzną sieci porów skał przedstawiono w postaci dwóch

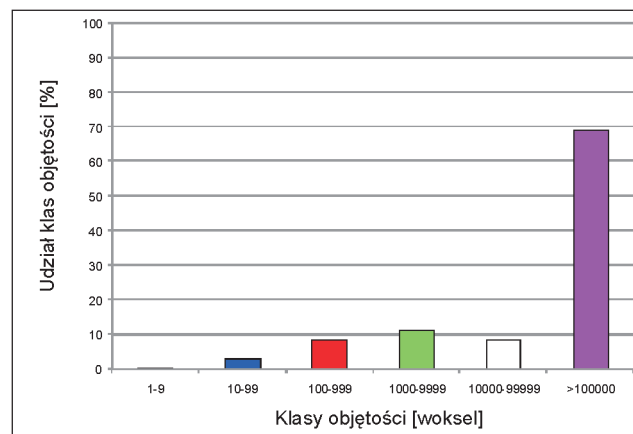
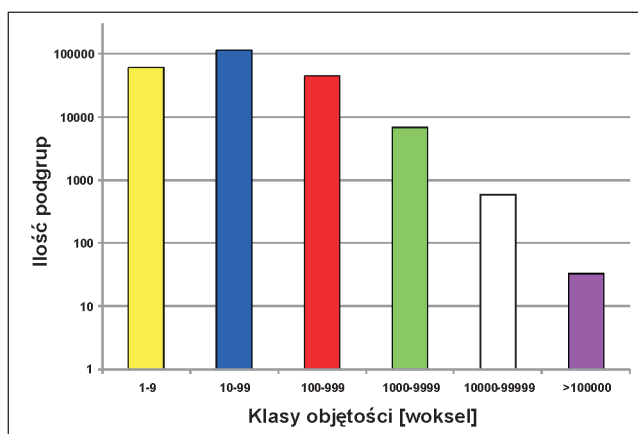
histogramów: pierwszego reprezentującego liczebność podgrup w poszczególnych klasach objętości i drugiego przedstawiającego rozkład klas objętości sieci porowej.

Ilościowy i procentowy udział poszczególnych klas objętości dla próbki nr 10276 – przed i po zabiegu kwasowania – przedstawiono na rysunku 5. Wynika z niego,

Przed zabiegiem kwasowania

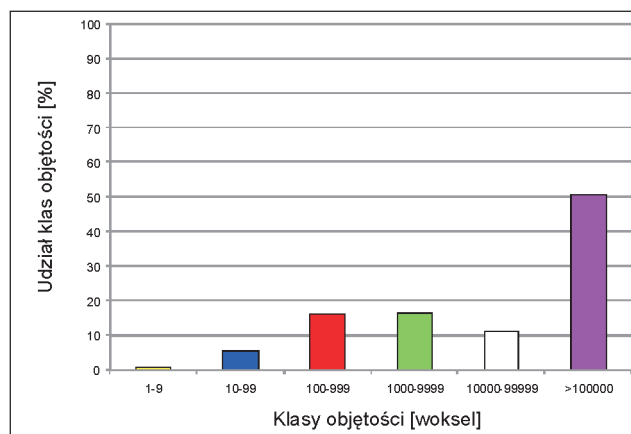
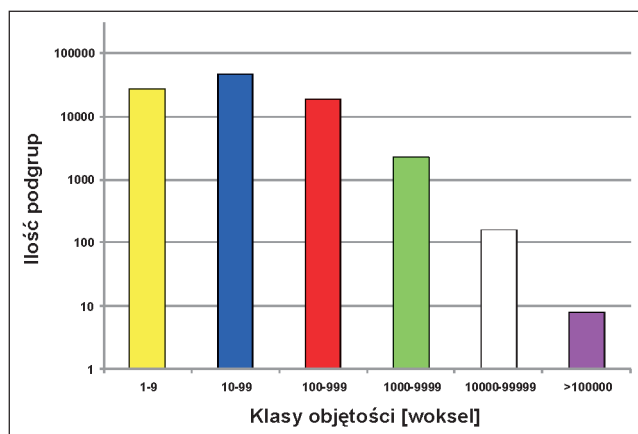


Po zabiegu kwasowania

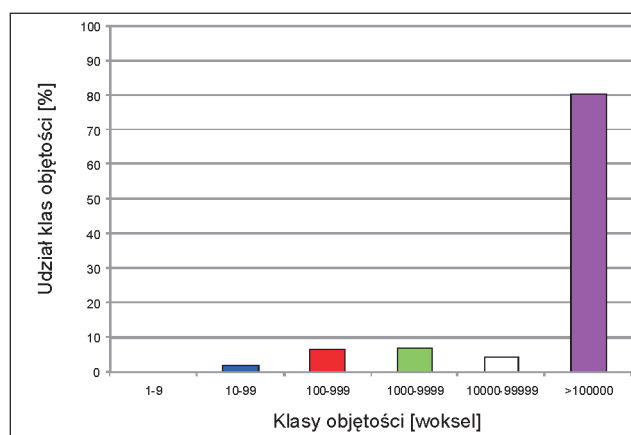
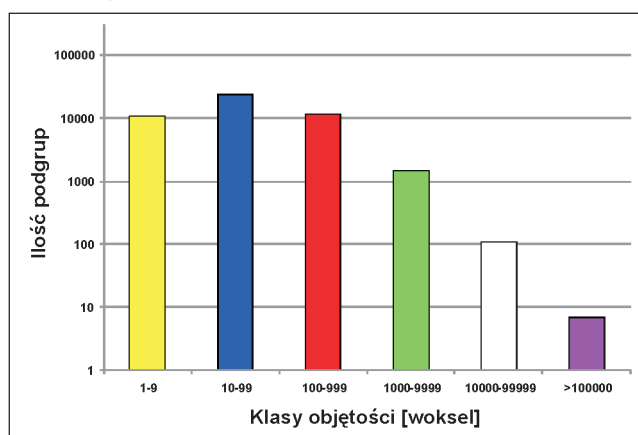


Rys. 5. Histogramy ilościowego i procentowego udziału poszczególnych klas objętości dla próbki nr 10276 – przed i po zabiegu kwasowania

## Przed zabiegiem kwasowania



## Po zabiegu kwasowania



Rys. 6. Histogramy ilościowego i procentowego udziału poszczególnych klas objętości dla próbki nr 10277 – przed i po zabiegu kwasowania

iz liczba poszczególnych klas objętości przed i po zabiegu utrzymała się na podobnym poziomie. Nieznacznie zmalała ilość porów o objętości klas I i II; wzrosła ilość porów należących do klas III–V; zaś ilość porów VI klasy pozostała na tym samym poziomie. Wykresy przedstawiające procentowy udział poszczególnych klas wykazują natomiast zdecydowany przyrost udziału klasy VI (2-krotny wzrost objętości klasy). Ilustruje to również rysunek 3b.

W strukturze przestrzeni porowej próbki nr 10277 zauważa się spadek ilości podstruktur sieci porowej (rysunek 6) w każdej klasie. Świadczy to o łączeniu się małych objętościowo obiektów w większe. Wykresy udziału klas objętości pokazują znaczny spadek udziału klas I–V, na rzecz znacznego (o 20%) wzrostu udziału klasy VI. Można to również zaobserwować porównując dwa obrazy na rysunku 3a.

#### Analiza połączeń sieci porowej

Analizę połączeń sieci porowej przeprowadzono wykorzystując w programie MAVI moduł do analizy geome-

trycznej krętości kanałów porowych. Moduł ten podaje wartość krętości tylko i wyłącznie wtedy, gdy następuje połączenie pomiędzy dwiema przeciwległymi płaszczyznami próbki. Trójwymiarowy charakter micro-CT umożliwia pomiar tego parametru w trzech kierunkach prostopadłych względem siebie: X, Y i Z, dostarczając równocześnie informacji o potencjalnej anizotropii w rozkładzie przestrzeni porowej skał zbiornikowych [8].

Wyniki analizy parametru krętości struktury porowej przy rozdzielczości pomiaru (20  $\mu\text{m}$ ) wykazują, iż próbka 10276 przed procesem kwasowania nie posiadała połączeń dla kanałków porowych o średnicy poniżej w żadnym z analizowanych kierunków (X, Y, Z). Po procesie kwasowania powstał kanałek robaczkowy, który udrożnił połączenia w kierunku osi Z. Średnia krętość powstałego kanałka wynosi 1,17, a jego przebieg nieznacznie odbiega od linii prostej (tablica 2). Ścieżka tego kanałka jest w większości prosta i przechodzi bokiem próbki rdzeniowej (<http://www.inig.pl/ZD/images/sw/video/sw-microCT.html>).

Próbka 10277 posiadała lepsze połączenia struktury

Tablica 2. Wyniki pomiaru krętości geometrycznej kanalików porowych

Próbka	Kierunek analizy krętości	Bezwzględna ilość wokseli z tunelu	Względna ilość wokseli z tunelu	Średnia krętość	Maksymalna krętość	Minimalna krętość	Odchylenie standardowe
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Próbka 10276</b>							
Przed kwasowaniem	X, Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	Brak połączenia kanalików porowych					
Po kwasowaniu	X, Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	32741,000	0,021	1,167	1,266	1,107	0,030
<b>Próbka 10277</b>							
Przed kwasowaniem	X, Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	2970,000	0,007	1,440	1,585	1,381	0,048
Po kwasowaniu	X, Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	36707,000	0,022	1,070	1,211	1,025	0,024

porowej przed procesem kwasowania; średnia krętość kanalików porowych w kierunku Z wynosiła 1,44; natomiast proces kwasowania zdecydowanie poprawił ten parametr – do wartości 1,07 – zapewniając łatwiejszy przepływ mediów. Ścieżka tego kanalika, w porównaniu do poprzedniej próbki, jest bardziej kręta, ale także przechodzi bokiem próbki rdzeniowej.

**Porównanie parametrów petrofizycznych**

Na podstawie wyników micro-CT stwierdzono, że przed zabiegiem kwasowania próbka 10276 posiadała bardzo słabo rozwiniętą sieć porową. Nieco lepszą strukturą porów cechowała się próbka 10277, ale generalnie obie wykazywały nieznaczne różnice w charakterze tej sieci. Zmiany wywołane procesem kwasowania dla obu próbek potwierdza zarówno wizualizacyjna analiza jako-

ściowa (rysunki 2, 3 i 4), jak również analiza wykresów ilościowego i procentowego udziału poszczególnych klas objętości (rysunki 5 i 6).

O zdecydowanej poprawie parametrów petrofizycznych badanych rdzeni wiertniczych świadczą również wyniki pomiarów współczynnika przepuszczalności absolutnej. Porównanie tych parametrów przed i po zabiegu kwasowania przytoczono w tablicy 3.

Z danych zamieszczonych w tej tablicy wynika, że próbka 10276 znacznie zwiększyła swoją porowatość – wyliczoną na podstawie analizy obrazów wewnętrznej struktury porowej – i że ta porowatość wzrosła o ok. 50%. Nieporównywalnie bardziej wzrosła przepuszczalność absolutna próbki, określona metodą gazową (azot). Na podobnym poziomie kształtuje się względny wzrost porowatości próbki nr 10277, natomiast współczynnik przepuszczalności w tym przypadku wzrósł nieporównywalnie bardziej.

Tablica 3. Porównanie parametrów petrofizycznych przed i po zabiegu kwasowania

Numer rdzenia	Skały węglanowe			
	Próbka 10276		Próbka 10277	
	przed badaniem	po badaniu	przed badaniem	po badaniu
Objętość porów [cm <sup>3</sup> ]	0,766	1,216	0,258	0,414
Porowatość micro-CT [% obj.]	8,8	13,3	3,0	4,8
Przepuszczalność [mD]	1,0	319,0	1,6	1937,0

**Podsumowanie**

Instytut Nafty i Gazu od wielu lat prowadzi prace, których celem jest opracowanie składu cieczy technolo-

gicznej do zabiegów kwasowania matrycowego o obniżonej szybkości reakcji. Jako jedyny ośrodek naukowo-badawczy



w kraju, Instytut posiada stanowisko do symulacji procesu kwasowania na rdzeniach naturalnych (*Acid Delivery System*) i mikrotomograf rentgenowski.

Przeprowadzenie badania na zaledwie dwóch próbkach umożliwiło dokonanie szeregu obserwacji w zakresie efektywności działania kwasu, w szczególności na trójwymiarowych obrazach, przedstawionych w postaci filmów.

Animacje – opierające się na danych generowanych przez skaner micro-CT i tworzone z wykorzystaniem nowoczesnych (3D) pakietów do przetwarzania obrazów

– okazały się wyjątkowo użytecznymi w obserwowaniu zmian zachodzących wewnątrz rdzeni po zatłoczeniu kwasu.

Podkreślić należy, że do chwili obecnej brak było metody kontrolującej rozprzestrzenianie się kwasu w przestrzeni porowej próbek skalnych. Wprowadzenie mikrotomografii rentgenowskiej umożliwi takie prace badawcze, jak również pozwoli na weryfikację teoretycznych obliczeń i numerycznej symulacji, w aspekcie badań nad skutecznością zabiegu kwasowania.

Artykuł nadesłano do Redakcji 19.05.2010 r. Przyjęto do druku 23.06.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

## Literatura

- [1] Czupski M.: *Ocena efektywności kwasowania matrycowego formacji węglanowych*. Nafta-Gaz nr 2, s. 100–106, 2010.
- [2] Hoefner M.I., Fogler H.S.: *Effective matrix acidizing in carbonates using microemulsions*. Chem. Eng. Prog. 40–44, 1985.
- [3] Nierode D.E., Williams B.B.: *Characteristics of acid reaction limestone formations*. SPEJ, 251, 406–418, December 1971.
- [4] Siddiqui S., Nasr-El-Din H.A., Khamees A.A.: *Wormhole initiation and propagation of emulsified acid in carbonate cores using computerized tomography*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 54, p. 93–111, 2006.
- [5] Van Geet M., Swennen R., Wevers M.: *Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography*. Sedimentary Geology, 132, 25–36, 2000.
- [6] Wellington, S.L., Vinegar, H.J.: *X-ray computerized tomography*. Journal of Petroleum Technology, vol. 39, p. 885–898, 1987.
- [7] Williams B.B., Gidley J.L., Schechter R.S.: *Acidizing fundamentals*. SPE Monograph, vol. 6. Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, USA, 124 pp, 1979.
- [8] Zalewska J., Dohnalik M., Poszytek A.: *Wizualizacja i analiza przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej*. Prace INiG nr 161, 83 s., Kraków 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. Autorka 110 publikacji w tym 6 monografii.



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. Mateusz MASŁOWSKI – absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracownik Zakładu Stymulacji Wydobywania Węglowodorów w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie, Oddział Krosno. Zajmuje się zagadnieniami związanymi ze stymulacją złóż węglowodorów.



Mgr inż. Elżbieta BIAŁY – absolwentka Wydziału Matematyczno-Fizycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów INiG Oddział w Krośnie. Zajmuje się zagadnieniami związanymi ze stymulacją wydobywania węglowodorów.