

Wykorzystanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w analizie zmian zachodzących w strukturze skał węglanowych po testach kwasowania

Use of X-ray computed tomography in the analysis of changes occurring in the structure of carbonate rocks after acidizing tests

Katarzyna Drabik, Marek Czupski, Anna Przelaskowska

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Przedstawiona praca miała na celu pokazanie, że na podstawie wyników badań rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) możliwe jest optymalne zaprojektowanie zabiegów matrycowego kwasowania w formacjach węglanowych. Metoda CT dała możliwość wizualizacji wewnętrznej przestrzeni porowej skał bez naruszenia ich struktury, co sprawia, że może być także wykorzystywana do oceny skuteczności zabiegów kwasowania. Kwasowanie jest techniką stosowaną w przemyśle naftowym w celu zwiększenia przepuszczalności skał zbiornikowych, wykorzystywaną najczęściej w przypadku skał węglanowych, w których kwas rozpuszcza matrycę skały, tworząc kanaliki robaczkowe. W ramach pracy wykonano zabiegi kwasowania przy użyciu tej samej cieczy kwasującej zatłaczanej z różną prędkością. Przebadano cztery próbki wapieni o wartościach porowatości mieszczących się w przedziale od 5,40% do 10,67% i przepuszczalności w przedziale od 0,26 mD do 0,47 mD. Badania laboratoryjne wykonano przed zabiegami kwasowania i po ich przeprowadzeniu. W efekcie zabiegów kwasowania w trzech próbkach zaobserwowano powstanie kanałków robaczkowych i związany z tym znaczący wzrost przepuszczalności. W dwóch próbkach, w których powstały kanaliki o dużej liczbie rozgałęzień, odnotowano nieefektywny model wyczerpywania się płynu kwasującego. Natomiast w próbce, w której zaobserwowano kanalik o nieskomplikowanej budowie, bez nadmiernej liczby rozgałęzień, objętość cieczy kwasującej niezbędna do jej przebicia przez całą długość rdzenia była najmniejsza. Obraz tomografii komputerowej potwierdził w pełni wyniki uzyskane na podstawie kwasowania. Szczegółowa parametryzacja utworzonych kanałków robaczkowych pozwoliła na klasyfikację objętościową porów, polegającą na podziale wyodrębnionych obiektów struktury porowej na klasy ze względu na ich objętość. Umożliwiła również określenie takich parametrów jak: objętość, długość, liczba gałęzi, liczba połączeń, średnia długość gałęzi, średni promień, krętość gałęzi, liczba koordynacyjna i liczba Eulera. Rentgenowska tomografia komputerowa pozwoliła na zobrazowanie i dokładne sparametryzowanie struktur powstałych podczas kwasowania, może więc z całą pewnością stanowić narzędzie wspierające projektowanie tego typu zabiegów stymulacji skał zbiornikowych.

Słowa kluczowe: rentgenowska tomografia komputerowa, wizualizacja przestrzeni porowej, kwasowanie matrycowe, kanaliki robaczkowe, przepuszczalność.

ABSTRACT: The presented work aimed at optimalization of matrix acidizing treatments in carbonate formations using the results of X-ray computed tomography (CT). X-ray computed tomography enables visualisation of the internal pore space of rocks without disturbing their structure. Therefore, this method can also be used to evaluate matrix acidizing tests. Matrix acidizing is employed in the oil industry as a reservoir stimulation method. It is most commonly applied to carbonate rocks, where the acid dissolves the rock matrix, forming long channels known as wormholes. In this study, matrix acidizing was performed using the same acidizing fluid injected at different interstitial velocities. Four limestone samples characterized by porosity values ranging from 5.40% to 10.67%, and permeability ranging from 0.26 to 0.47 mD were analysed. Laboratory tests were performed before and after acidizing treatments. As a result, wormholes formed, and a significant increase in permeability was observed in three samples. An inefficient pattern of depletion of the acidizing fluid was noted in two samples that developed channels with numerous branches. In contrast, the number of pore volumes of the acidizing fluid required for breakthrough was smallest in the sample that developed a wormhole with an uncomplicated structure few branches. CT imaging fully confirmed the results obtained from the acidizing tests. Detailed parameterisation of the formed wormholes allowed for volumetric classification of pores by dividing isolated pore-structure objects into volume-based classes. It also enabled the determination of parameters such as volume, length, number of branches, number of connections, average branch length,

average radius, branch curvature, coordination number, and Euler number. The use of X-ray computed tomography allowed confirmation of results from acidizing tests and enabled detailed parameterisation of the wormholes. Thus, X-ray computed tomography can be considered a valuable tool supporting the design of this type of reservoir stimulation

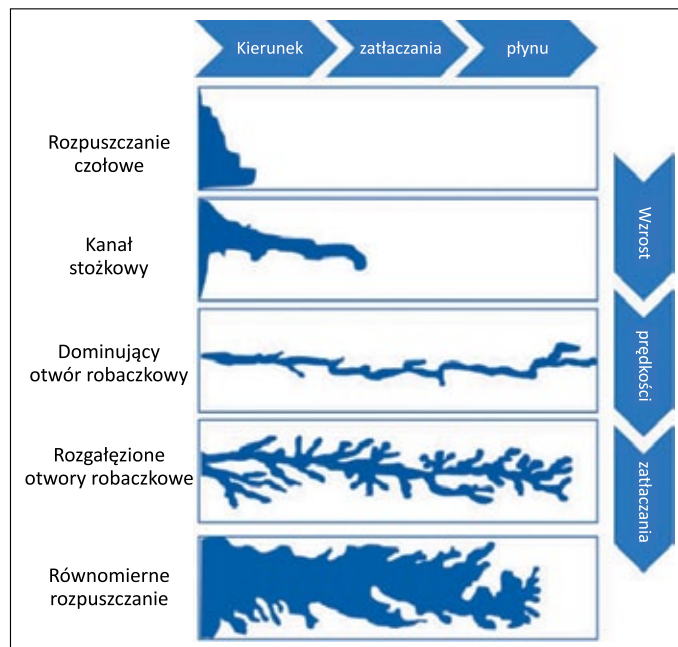
Key words: X-ray computed tomography, pore space visualisation, matrix acidizing, wormholes, permeability.

Wstęp

Kwasowanie jest techniką wykorzystywaną w przemyśle naftowym w celu zwiększenia przepuszczalności skał zbiornikowych. Zabieg ten polega na zatłaczaniu do formacji skalnej odpowiednio dobranej cieczy kwasującej. Kwasowanie może być stosowane w skałach silikoklastycznych, w których umożliwia ono rozpuszczanie minerałów zalegających w przestrzeni porowej i blokujących przepływ płynów. Zdecydowanie częściej wykorzystywane jest jednak w formacjach węglanowych, w których kwas rozpuszcza skałę w sposób niejednorodny, tworząc kanaliki robaczkowe. W naturalnie szczelinowatych złożach węglanowych kanaliki robaczkowe łączą ze sobą istniejące szczeliny, tworząc długie kanały przepływowe, głęboko penetrujące formację skalną. Przepuszczalność strefy przyodwiertowej zawierającej kanaliki robaczkowe jest zwykle kilka rzędów wielkości większa od oryginalnej przepuszczalności skały. Sam proces rozpuszczania matrycy skalnej to proces złożony, na który wpływają zarówno parametry ośrodka skalnego (niejednorodność i nasycenie skały, zróżnicowanie szybkości rozpuszczania minerałów, geometria i topologia przestrzeni porowej), jak też warunki termodynamiczne oraz parametry płynu kwasującego i sposób jego zatłaczania do złoża (Yoo i in., 2021; Lucas i in., 2023).

Różne warunki zatłaczania płynów kwasujących skutkują różnymi wzorcami rozpuszczania formacji. Rysunek 1 ilustruje wpływ prędkości przepływu cieczy kwasującej przez skałę na kształt kanalików robaczkowych. Powolne zatłaczanie sprawia, że płyn nie wnika w głąb formacji, a tylko rozpuszcza czoło próbki. Wraz ze wzrostem prędkości zatłaczania powstają różne typy kanalików z mniejszą lub większą liczbą rozgałęzień. Optymalny przypadek to długi wąski kanał główny z niewielkimi odgałęzieniami (Daeffler i in., 2018).

Celem pracy było optymalne zaprojektowanie zabiegów kwasowania w formacjach węglanowych na podstawie wyników badań rentgenowskiej tomografii komputerowej. Metoda ta stanowi podstawę oceny procesów kwasowania, koncentrując się na parametrach jakościowych i ilościowych kanalików robaczkowych, powstałych podczas kwasowania matrycy (Urgel-Pinto i Alcázar-Vara, 2024). Kanaliki stają się głównymi ścieżkami przepływu, znacznie zwiększającymi przepuszczalność skały oraz powodującymi poprawę połączenia między otworem wiertniczym a formacją skalną (Zalewska i in., 2010; Czupski i Kasza, 2017; Li i in., 2019; Cooper i in., 2023).



Rysunek 1. Typy kanalików robaczkowych w funkcji prędkości zatłaczania płynu (na podstawie Daeffler i in., 2018)

Figure 1. Wormhole types as a function of fluid injection rate (based on Daeffler et al., 2018)

Testy przepływowe wykonano przy różnych szybkościach przepływu cieczy kwasującej dla czterech próbek skał węglanowych. Eksperyment został przeprowadzony w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów w Krośnie INiG – PIB. W Zakładzie Geofizyki Wiertniczej przeprowadzono natomiast badania tomograficzne oraz szereg analiz laboratoryjnych, wykonanych przed zabiegami kwasowania i po nich. Miały one na celu prześledzenie zmian, jakie zaszły w przestrzeni porowej i składzie mineralnym testowych rdzeników. Eksperyment pozwolił powiązać zaobserwowane zmiany w strukturze skały z parametrami kwasowania.

Charakterystyka materiału badawczego

Do badań wykorzystano cztery próbki wapieni o zbliżonym składzie mineralnym. W celu scharakteryzowania właściwości wybranych skał wykonano pomiary gęstości, porowatości i przepuszczalności oraz badania składu mineralnego. Gęstość i porowatość określono metodą piknometrii helowej przy zastosowaniu dwóch współpracujących ze sobą aparatów: AccuPyc II 1340 i GeoPyc 1360. Badania przepuszczalności

przeprowadzono za pomocą aparatu Gas Permeameter firmy Temco. Analizę składu mineralnego wykonano metodą ilościowej analizy rentgenowskiej opartej na technice Rietvelda (Kowalska, 2013) przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego X'Pert Pro firmy Panalytical. Pomiary przeprowadzono przed zabiegami kwasowania i po ich wykonaniu.

Badane wapienie różnią się stosunkiem zawartości kalcytu do dolomitu; próbki B i C zawierają większą ilość dolomitu (25%), a próbki A i D tylko niewielką domieszkę tego minerału (3,5%). Porowatość Kp_{Hel} próbek przed kwasowaniem mieściła się w zakresie od 5,40% do 10,67%, a przepuszczalność od 0,26 mD do 0,47 mD.

Metodyka pomiarowa

Rentgenowska tomografia komputerowa

Rentgenowska tomografia komputerowa posłużyła do analizy kształtu i parametrów kanalików robaczkowych powstałych w próbkach po zabiegu kwasowania. Pomiary przeprowadzono, korzystając z urządzenia RXCT (*Rotating X-Ray And Computed Tomography*) firmy Geotek, zoptymalizowanego do badania skał. Aparat wyposażony jest w lampę rentgenowską Thermo Kevex X-ray Inc. typu PXS10-65W, o maksymalnej mocy 65 W przy napięciu przyspieszającym 130 kV. Urządzenie pozwala na badanie próbek o średnicy od 2,5 cm do 15 cm oraz o długości do 150 cm. Rozdzielczość otrzymywanych obrazów wynosi od 25 μm do 300 μm . Do analizy obrazu wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie Avizo 3D Pro (Thermo Fisher Scientific).

Metoda CT w analizie testów przepływowych z użyciem płynów kwasujących może być stosowana poprzez:

- porównanie obrazów próbki przed eksperymentem i po nim oraz analizę zmian w wewnętrznej strukturze skały;
- śledzenie dynamiki propagacji kanalika poprzez wykonanie serii pomiarów CT podczas zatłaczania płynu kwasującego (Cooper i in., 2023).

W pracy zastosowano pierwszą metodę. Obrazy 3D kanalików stały się podstawą do wyznaczenia takich parametrów przestrzeni porowej jak: objętość, pole powierzchni, średnica ekwiwalentna, długość i liczba Eulera dla poszczególnych elementów oraz liczba gałęzi składających się na kanalik, liczba węzłów, krętość gałęzi, liczba koordynacyjna i inne. Parametry te wykorzystano do oceny wpływu prędkości przepływu cieczy kwasującej na geometrię kanalików.

Laboratoryjne testy kwasowania

Badania przeprowadzono przy użyciu stanowiska Coreflooding System AFS-300 firmy Core Lab. Przed testem umieszczono w komorze rdzeniowej (Hasslera) tego urządzenia

cyldryczny rdzeń węglanowy o średnicy 2,54 cm (1,0"). Rdzeń ten był wcześniej nasycony w warunkach podciśnienia 2-proc. roztworem chlorku potasu (KCl). W trakcie dogrzewania układu do temperatury badania (60°C) rozpoczynano tłoczenie 2-proc. roztworu chlorku potasu, a wartość przeciwcisnienia ustalano na 6,89 MPa, aby utrzymać w roztworze powstający w wyniku reakcji dwutlenek węgla. Po ustabilizowaniu temperatury i przepływu rejestrowano różnicę ciśnień (Δp) przed i za rdzeniem i na jej podstawie wyliczono przepuszczalność dla cieczy. Następnie przez rdzeń tłoczono ciecz kwasującą, którą była nowa mieszanina kwasów, związków chelatujących i alkoholi, aż do uzyskania tzw. przebicia, czyli momentu, gdy wytrawiony kanalik robaczkowy spenetrował całą długość rdzenia, co objawiało się spadkiem różnicy ciśnień Δp do bardzo małych wartości. Na tej podstawie wyznaczano liczbę objętości porowych cieczy kwasującej niezbędnych do przebicia (PV_{bt}). Liczba objętości porowych niezbędnych do przebicia jest definiowana jako łączna objętość cieczy kwasującej wtłoczonej do rdzenia w momencie, gdy otwór robaczkowy obejmie całą jego długość, podzielona przez objętość porów rdzenia. Na końcu testu ponownie tłoczono 2-proc. roztwór KCl w celu określenia przepuszczalności rdzenia po jego laboratoryjnym kwasowaniu. Parametrem zmiennym podczas poszczególnych kwasowań była prędkość przepływu cieczy kwasującej. Po wyjęciu korka rdzeniowego z komory Hasslera i po jego wysuszeniu wykonano fotografie jego powierzchni czołowych.

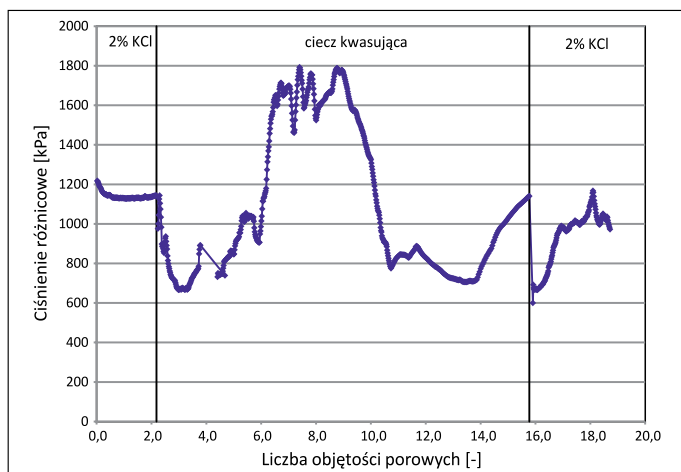
Wyniki badań przepływowych

Na rysunku 2 przedstawiono zapis ciśnienia różnicowego podczas badania przepływowego dla rdzenia A, dla prędkości przepływu cieczy kwasującej V_f równej **0,30** cm/min. Rysunki 3 i 4 przedstawiają fotografie powierzchni wlotowej i wylotowej rdzenia A po teście przepływowym.

Drugi test laboratoryjnego kwasowania przeprowadzono dla rdzenia B, dla prędkości przepływu mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi V_f równej **0,45** cm/min. Zapis zarejestrowanego ciśnienia różnicowego podczas tego procesu przedstawiono na rysunku 5. Rysunki 6 i 7 przedstawiają fotografie powierzchni wlotowej i wylotowej rdzenia B po teście przepływowym.

Z kolei na rysunku 8 przedstawiono zapis ciśnienia różnicowego podczas badania przepływowego dla rdzenia C, dla prędkości przepływu mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi V_f równej **0,60** cm/min. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono fotografie powierzchni wlotowej i wylotowej rdzenia C po teście przepływowym.

Rysunek 11 przedstawia zapis ciśnienia różnicowego podczas badania przepływowego dla rdzenia D, dla prędkości



Rysunek 2. Zapis ciśnienia różnicowego zarejestrowanego podczas testu przepływowego na rdzeniu A z użyciem mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi ($V_i = 0,30$ cm/min)

Figure 2. Differential pressure recorded during flow test on core A with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols ($V_i = 0.30$ cm/min)



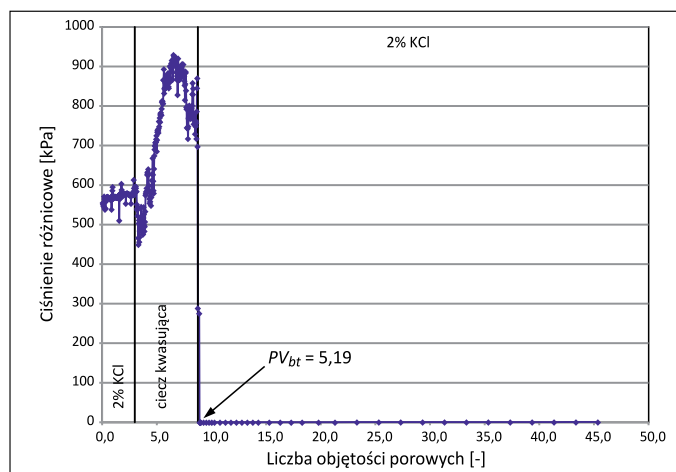
Rysunek 3. Powierzchnia wlotowa rdzenia A po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 3. Inlet surface of core A after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 4. Powierzchnia wylotowa rdzenia A po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 4. Outlet surface of core A after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 5. Zapis ciśnienia różnicowego zarejestrowanego podczas testu przepływowego na rdzeniu B z użyciem mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi ($V_i = 0,45$ cm/min, $PV_{bt} = 5,19$)

Figure 5. Differential pressure recorded during flow test on core B with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols ($V_i = 0.45$ cm/min, $PV_{bt} = 5.19$)



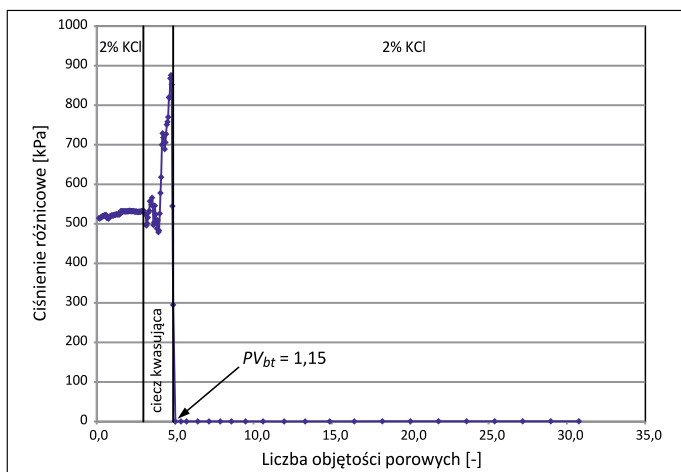
Rysunek 6. Powierzchnia wlotowa rdzenia B po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 6. Inlet surface of core B after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 7. Powierzchnia wylotowa rdzenia B po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 7. Outlet surface of core B after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 8. Zapis ciśnienia różnicowego zarejestrowanego podczas testu przepływowego na rdzeniu C z użyciem mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi ($V_i = 0,60$ cm/min, $PV_{bt} = 1,15$)

Figure 8. Differential pressure recorded during flow test on core C with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols ($V_i = 0.60$ cm/min, $PV_{bt} = 1.15$)



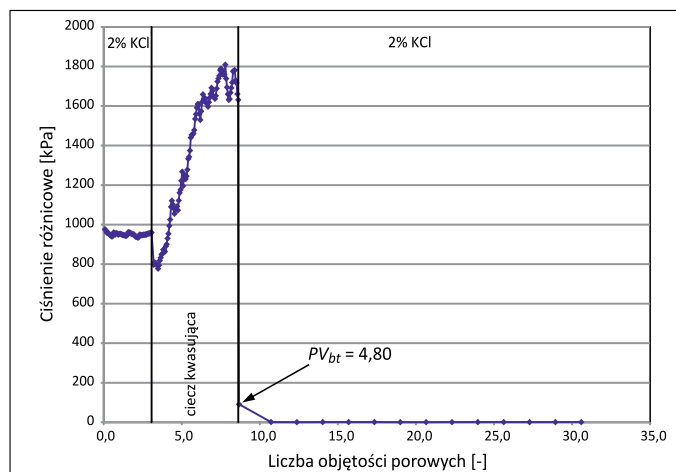
Rysunek 9. Powierzchnia wlotowa rdzenia C po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 9. Inlet surface of core C after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 10. Powierzchnia wylotowa rdzenia C po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 10. Outlet surface of core C after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 11. Zapis ciśnienia różnicowego zarejestrowanego podczas testu przepływowego na rdzeniu D z użyciem mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi ($V_i = 1,01$ cm/min, $PV_{bt} = 4,80$)

Figure 11. Differential pressure recorded during flow test on core C with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols ($V_i = 1.01$ cm/min, $PV_{bt} = 4.80$)



Rysunek 12. Powierzchnia wlotowa rdzenia D po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 12. Inlet surface of core D after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols



Rysunek 13. Powierzchnia wylotowa rdzenia D po kwasowaniu mieszaniną kwasów, związków chelatujących i alkoholi

Figure 13. Outlet surface of core D after acidizing with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols

Tabela 1. Przepuszczalność skał zmierzona podczas testów przepływowych na rdzeniach z udziałem mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi, prędkość przepływu (V_i) oraz liczba objętości porowych niezbędnych do przebiccia cieczy kwasującej (PV_{bt})

Table 1. Permeabilities of the rocks measured during core flow tests with a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols, interstitial velocity (V_i), and the number of acidizing liquid pore volumes required to breakthrough the core plug (PV_{bt})

Rdzeń	k dla 2% KCl przed kwasowaniem	k dla 2% KCl po kwasowaniu	V_i	PV_{bt}
	[mD]	[mD]	[cm/min]	[-]
A	0,05	0,06	0,30	brak przebiccia
B	0,25	18 674,8	0,45	5,19
C	0,27	11 478,0	0,60	1,15
D	0,24	8 955,9	1,01	4,80

przepływu mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi V_i równej **1,01** cm/min. Rysunki 12 i 13 przedstawiają fotografie powierzchni wlotowej i wylotowej rdzenia D po teście przepływowym.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry zarejestrowane podczas badań przepływowych z udziałem mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi. Pogrubioną czcionką wyróżniono eksperyment, dla którego dla testowanego układu ciecz kwasująca-skała otrzymano najmniejszą wartość PV_{bt} . Należy tutaj zaznaczyć, że pomiary przepuszczalności k po kwasowaniu dla badań, w których osiągnięto przebiccie, były obciążone błędem, gdyż ciśnienie różnicowe znajdowało się na granicy mierzalności najbardziej dokładnego przetwornika.

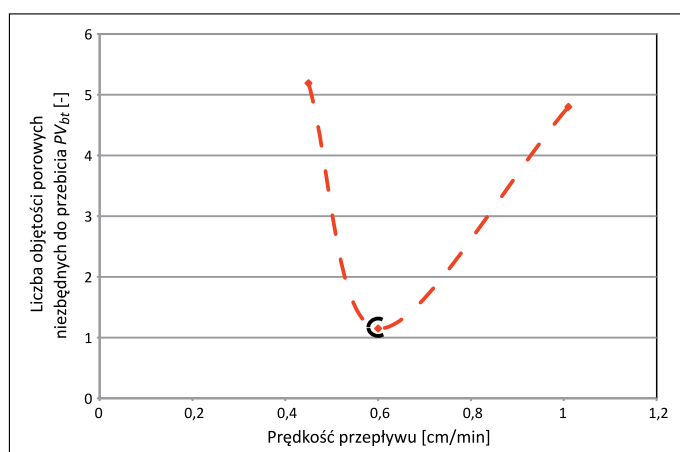
Rysunek 14 przedstawia zależność liczby objętości porowych niezbędnych do przebiccia od prędkości przepływu

cieczy kwasującej na bazie mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi dla rdzeni węglanowych.

Parametrem uzyskiwanym z badań przepływowych, na który należy zwrócić uwagę, jest liczba objętości porowych niezbędnych do przebiccia cieczy kwasującej przez rdzeń (PV_{bt}). Im mniejsze wartości tego parametru, tym mniej kwasu będzie się zużywało w strefie tuż przy odwiercie, a więcej będzie mogło być transportowane głębiej w formację.

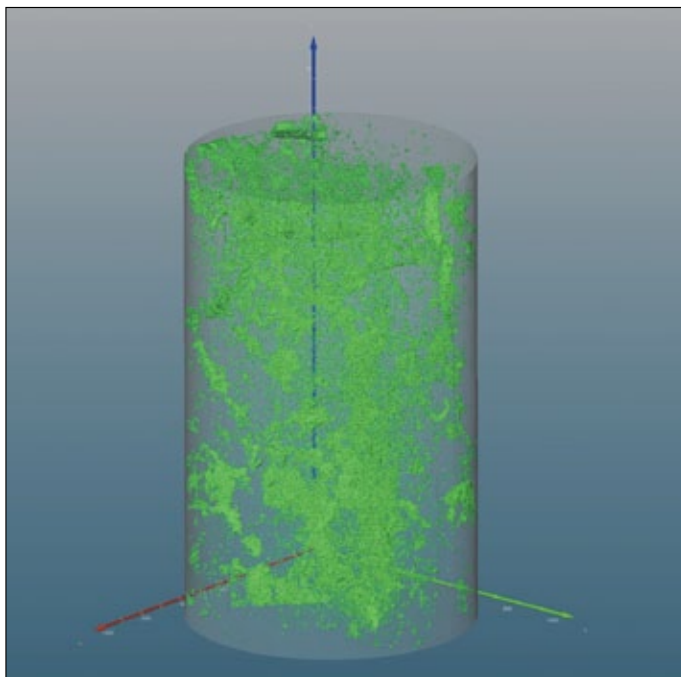
Badanie dla **prędkości przepływu** równej **0,30** cm/min przerwano po zatłoczeniu 12,9 PV cieczy kwasującej bez osiągnięcia penetracji tworzonych przez ciecz kwasującą kanałików robaczkowych przez całą długość rdzenia A. Natomiast na powierzchni wlotowej tego rdzenia (rysunek 3) widoczne jest działanie mechanizmu rozpuszczania czołowego, bardzo niekorzystne z punktu widzenia efektywności zabiegu. Brak przebiccia potwierdza również obraz powierzchni wylotowej rdzenia (rysunek 4) oraz zapis ciśnienia różnicowego w trakcie testu (rysunek 2), podczas którego nie zanotowano wyraźnego spadku ciśnienia tłoczzonej cieczy kwasującej. Także na obrazie przestrzeni porowej rdzenia wygenerowanym za pomocą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej nie zaobserwowano utworzenia się kanałika robaczkowego (rysunki 15 i 16 – obrazy tomograficzne próbki A przed testem i po teście).

Kolejny test przeprowadzono dla **prędkości przepływu** równej **0,45** cm/min. Powstały otwór robaczkowy spenetrował całą długość rdzenia, co jest widoczne na fotografii powierzchni wylotowej rdzenia (rysunek 7) oraz w zapisie ciśnienia różnicowego (rysunek 5), na którym ostry spadek jego wartości nastąpił po przetłoczeniu 5,19 PV cieczy kwasującej. Natomiast fotografia powierzchni wlotowej (rysunek 6), z widocznym szerokim wejściem do kanału, może świadczyć o tym, że w tym przypadku został utworzony stożkowy otwór robaczkowy. Potwierdza to obraz przestrzeni porowej rdzenia B. Po kwasowaniu został utworzony szeroki otwór o stożkowym kształcie z pewną liczbą rozgałęzień (rysunek 18). W przypadku takiego modelu rozpuszczania, kwas reaguje głównie ze



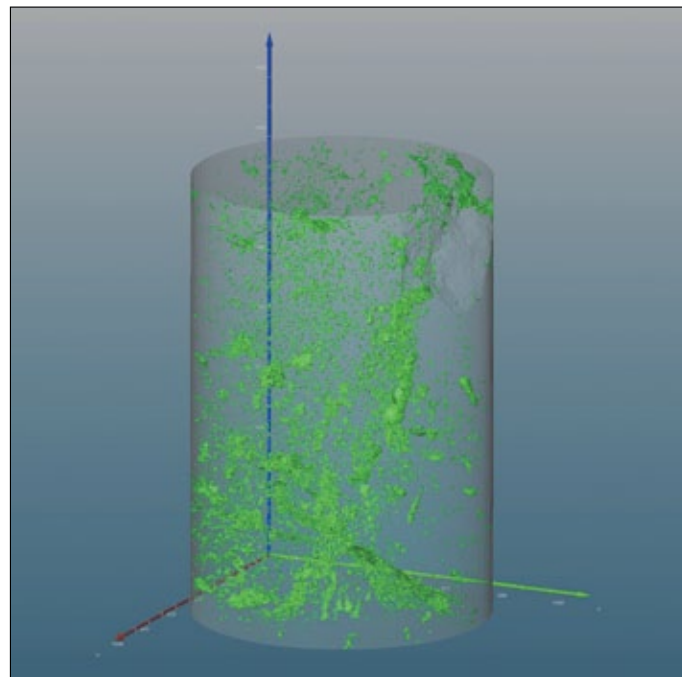
Rysunek 14. Zależność liczby objętości porowych niezbędnych do przebiccia od prędkości przepływu cieczy kwasującej na bazie mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi dla rdzeni węglanowych w temperaturze 60°C

Figure 14. Dependence of the number of pore volumes required for breakthrough on the interstitial velocity of an acidizing liquid based on a mixture of acids, chelating compounds, and alcohols for carbonate cores at 60°C



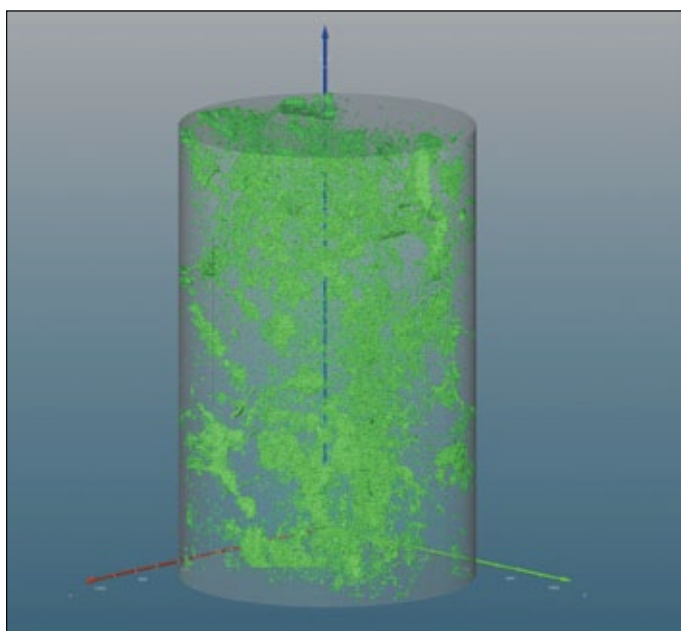
Rysunek 15. Obraz tomograficzny próbki A przed testem kwasowania

Figure 15. Tomographic image of sample A before acidizing test



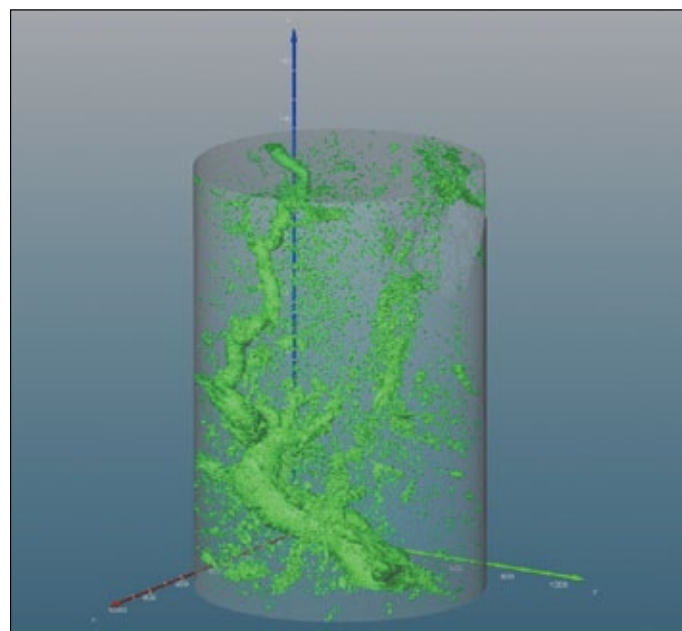
Rysunek 17. Obraz tomograficzny próbki B przed testem kwasowania

Figure 17. Tomographic image of sample B before acidizing test



Rysunek 16. Obraz tomograficzny próbki A po teście kwasowania

Figure 16. Tomographic image of sample A after acidizing test



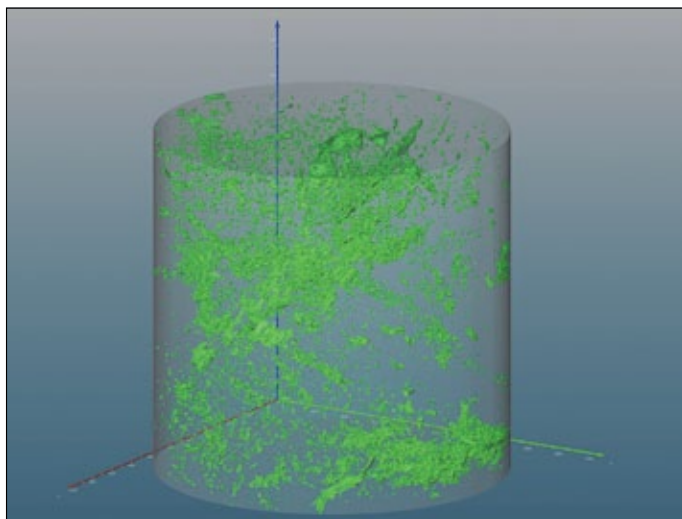
Rysunek 18. Obraz tomograficzny próbki B po teście kwasowania

Figure 18. Tomographic image of sample B after acidizing test

ścianami kanału, zamiast być transportowany do jego końcowego odcinka, co jest warunkiem istotnego wydłużenia otworu lub też utworzenia innych kanałów porowych. Świadczyło to o tym, że prędkość przepływu cieczy była ciągle za mała, aby osiągnąć odpowiedni model rozpuszczania skał węglanowych poddanych badaniom.

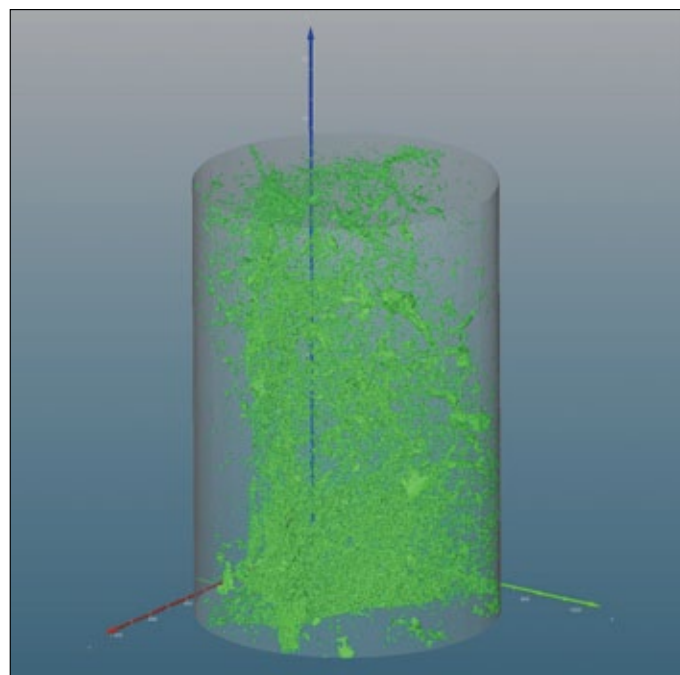
Dla układu ciecz kwasująca na bazie mieszaniny kwasów, związków chelatujących i alkoholi – testowana skała węglanowa

osiągnęła najmniejszą wartość PV_{bt} , równą 1,15, otrzymano w badaniu, w którym **prędkość przepływu** wynosiła **0,60 cm/min**. Wartość ta została zaznaczona czarną obwiednią na rysunku 14. Na powierzchni wlotowej rdzenia C widoczny jest bardzo wąski początek kanału (rysunek 9), podobny jest również jego koniec, który można zauważyć na powierzchni wylotowej (rysunek 10). Obraz przestrzeni porowej rdzenia C wskazuje na utworzenie wąskiego otworu robaczkowego penetrującego



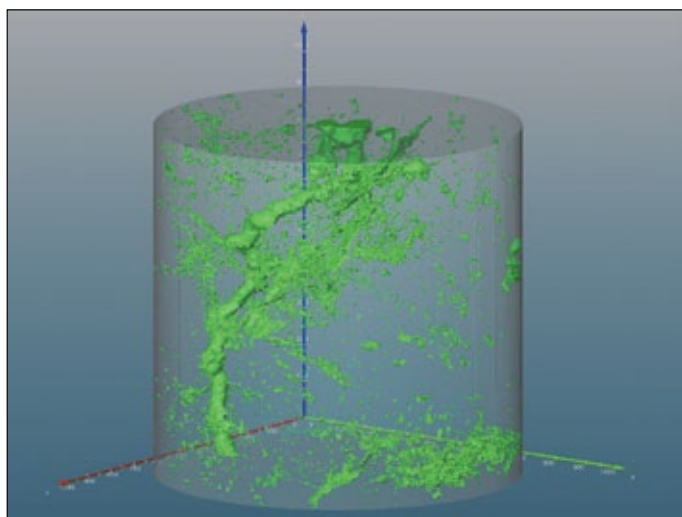
Rysunek 19. Obraz tomograficzny próbki C przed testem kwasowania

Figure 19. Tomographic image of sample C before acidizing test



Rysunek 21. Obraz tomograficzny próbki D przed testem kwasowania

Figure 21. Tomographic image of sample D before acidizing test

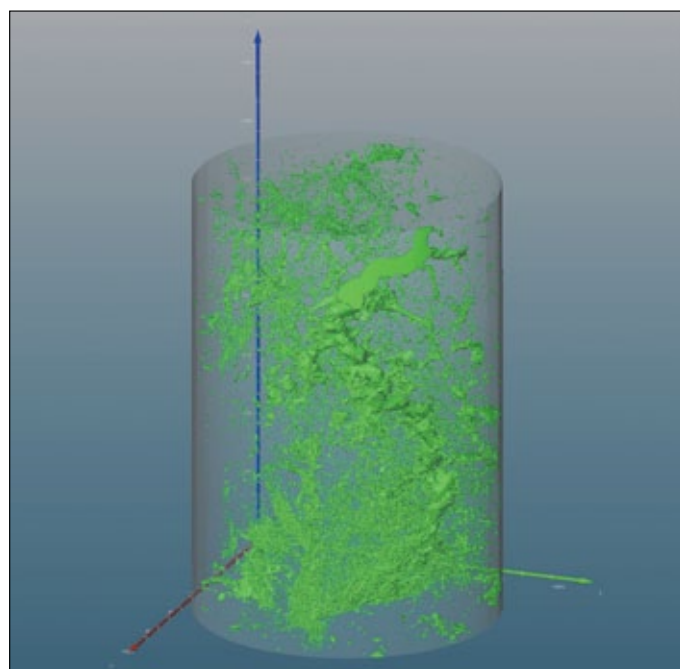


Rysunek 20. Obraz tomograficzny próbki C po teście kwasowania

Figure 20. Tomographic image of sample C after acidizing test

przez całą długość rdzenia (rysunki 19 i 20 – obrazy tomograficzne próbki C odpowiednio przed testem i po teście). Można więc stwierdzić, że dla tej prędkości przepływu otrzymano dominujący otwór robaczkowy, który reprezentuje optymalną kombinację prędkości przepływu cieczy i reaktywności dla testowanego układu ciecz kwasująca–skała w temperaturze 60°C. Kwas przed przereagowaniem transportowany jest wtedy do końca tworzonych otworów robaczkowych, istotnie je wydłużając. Dzięki temu mają one szansę dotarcia poza uszkodzoną strefę przyodwiertową podczas zabiegów matrycowego kwasowania.

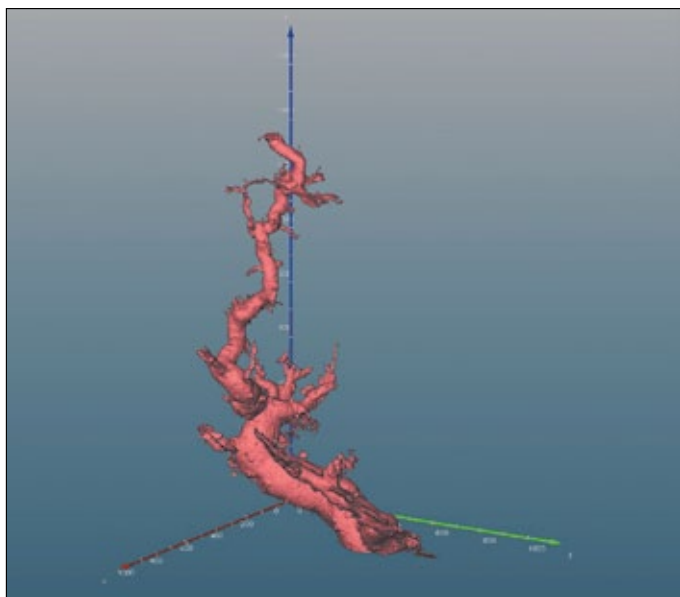
Dalszy wzrost prędkości przepływu do 1,01 cm/min skutkowało zwiększeniem wartości PV_{br} do 4,80. Na powierzchni wlotowej rdzenia D (rysunek 12) widoczne są wejścia do dwóch utworzonych otworów robaczkowych. Z kolei obraz



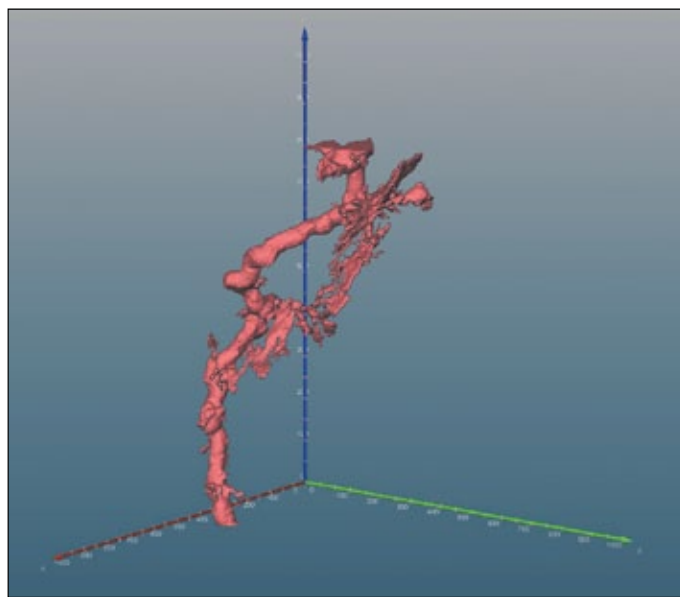
Rysunek 22. Obraz tomograficzny próbki D po teście kwasowania

Figure 22. Tomographic image of sample D after acidizing test

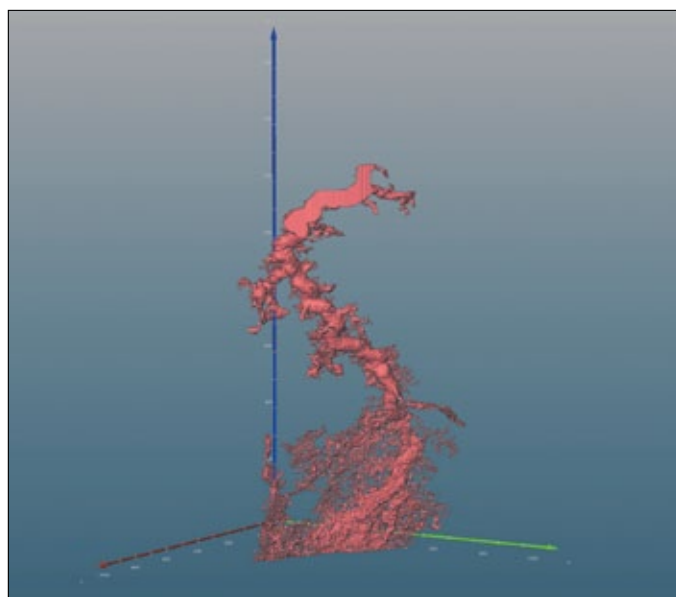
przestrzeni porowej wskazuje na powstanie bardzo rozgałęzionej struktury (rysunki 21 i 22 – obrazy tomograficzne próbki D przed testem i po teście). W tym przypadku zwiększenie prędkości przepływu poza wartość optymalną dla danych warunków temperaturowych skutkowało rozgałęzieniem struktury otworów robaczkowych, co również ogranicza ich penetrację.



Rysunek 23. Stożkowy kanalik robaczkowy w próbce B
Figure 23. Conical wormhole in sample B



Rysunek 24. Dominujący kanalik robaczkowy w próbce C
Figure 24. Dominant wormhole in sample C



Rysunek 25. Rozgałęzione kanaliki robaczkowe w próbce D
Figure 25. Branched wormholes in sample D

Podsumowując, laboratoryjne kwasowania zostały przeprowadzone w taki sposób, że podczas nich zmienną była prędkość przepływu cieczy kwasującej. Przełożyło się to na uzyskanie różnych, opisywanych w literaturze, modeli rozpuszczania formacji węglanowych – od rozpuszczania czołowego, poprzez kanały stożkowe i dominujące otwory robaczkowe, aż po rozgałęzione otwory robaczkowe (rysunki 23–25).

Na podstawie najmniejszej wartości liczby objętości porowych niezbędnych do przebicia wyznaczono optymalną dla danego układu skała–ciecz kwasująca–temperatura wartość prędkości przepływu cieczy. Potwierdził to również obraz

utworzonego dominującego kanalika robaczkowego, a więc struktury najbardziej pożądanej z punktu widzenia efektywności zabiegu. Zatem, najmniejsza wartość PV_{br} doskonale korelowała z wynikami analiz rdzeni przy użyciu mikrotomografii komputerowej. Wykazano, że ciecz kwasującą o odpowiednio dobranym składzie należy zatłoczyć do odwiertu z optymalnym dla niej i warunków złożowych natężeniem przepływu. Wyniki tego typu badań mogą zostać wykorzystane jako dane wejściowe do wykonania projektów i symulacji zabiegów matrycowego kwasowania w formacjach węglanowych przy użyciu komercyjnego oprogramowania.

Tabela 2. Charakterystyka materiału badawczego**Table 2.** Characteristics of the research material

Oznaczenie próbki	Skład mineralny			Kp_{Hel} [%]	Kp_{CT} [%]	K_{PRZ} [mD]	Zabieg kwasowania		
	Q [%]	C [%]	D [%]				V_i [cm/min]	$K_{PRZ, 2\%KCL}$ [mD]	PV_{bt}
A	1,60	94,90	3,50	5,40	0,76	0,26		0,05	
A_KW	1,50	96,30	2,20	4,78	0,73	?	0,30	0,06	brak przebicia
B	0,70	74,30	25,00	10,45	0,52	0,47		0,25	
B_KW	0,80	65,80	33,40	9,64	2,81	2587,47	0,45	18674,80	5,19
C	0,70	74,30	25,00	10,67	0,85	0,33		0,27	
C_KW	0,50	76,60	22,90	10,04	1,02	1100,83	0,60	11478,00	1,15
D	1,60	94,90	3,50	7,30	0,92	0,34		0,24	
D_KW	1,50	95,80	2,70	7,62	1,17	1079,33	1,01	8955,90	4,80

Objaśnienia: _KW – próbki po zabiegu kwasowania; Q – kwarc; C – kalcyt; D – dolomit; Kp_{Hel} – porowatość próbki wyznaczona metodą piknometryczną; Kp_{CT} – porowatość wyznaczona na podstawie CT (rozdzielczość obrazu – 24,4 μ m); V_i – prędkości przepływu cieczy kwasującej; K_{PRZ} – przepuszczalność rdzeni zmierzona podczas testów przepływowych; PV_{bt} – liczba objętości porowych niezbędnych do przebicia cieczy kwasującej przez próbkę.

Tabela 3. Klasyfikacja objętościowa porów**Table 3.** Pore volume classification

Objętość podsystemu porów [woksel]	1–9	10–99	100–999	1000–9999	10 000–99 999	100 000–1 000 000	>1 000 000
Klasa	I	II	III	IV	V	VI	VII
Kolor	żółty	niebieski	czerwony	zielony	biały	fioletowy	koralowy

Charakterystyka materiału badawczego – stan po zabiegach kwasowania

Po kwasowaniu nie zaobserwowano wyraźnych zmian w składzie mineralnym (tabela 2), nie odnotowano też zmiany porowatości (tabela 2). Jest to prawdopodobnie związane z faktem, że rozpuszczany materiał węglanowy uzyskany po wytrawieniu kanałika/kanałików nie jest wypłukiwany z próbki, ale osadzony w porach sąsiadujących z kanałikiem. W przypadku trzech próbek, w których po kwasowaniu powstał kanałik i uzyskano przebicie, zanotowano bardzo duży wzrost przepuszczalności, zarówno dla gazu, jak i dla cieczy (tabela 2). W jednym przypadku (próbka A) nie doszło do przebicia, a co za tym idzie – przepuszczalność nie wzrosła.

Wyniki badań CT

W pracy wykonano rozszerzoną analizę przestrzeni porowej próbek przed eksperymentem kwasowania i po nim. Przeprowadzono analizę parametrów geometrycznych

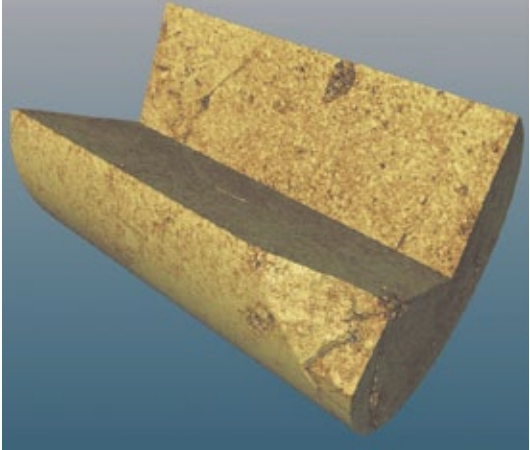
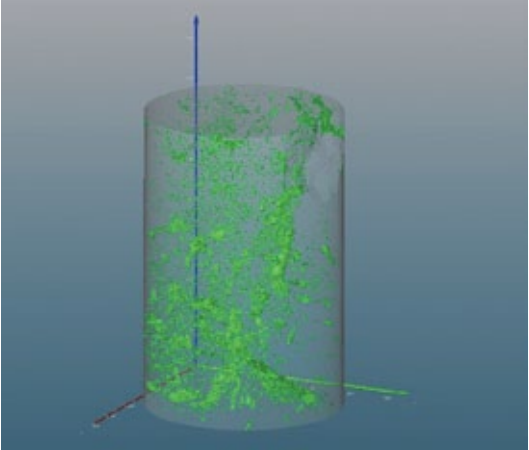
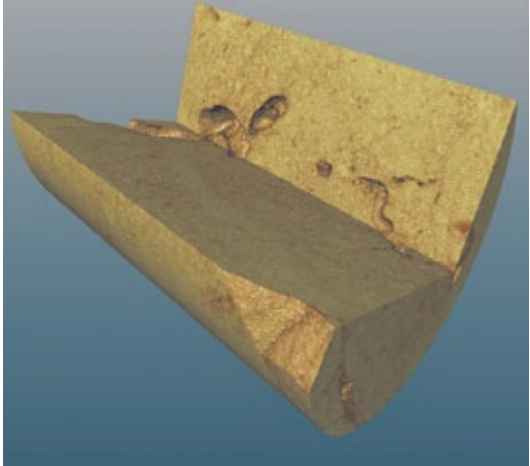
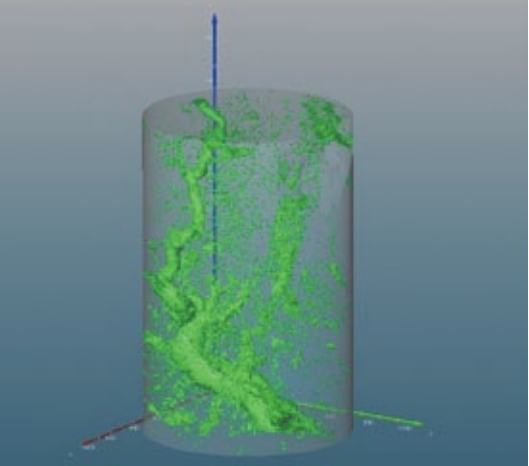
i topologicznych wytrawionych kanałików, a także klasyfikację objętościową porów, polegającą na podziale wyodrębnionych obiektów struktury porowej na klasy ze względu na ich objętość (Zalewska i in., 2009; tabela 3).

Próbka A

Próbka A była jedną z czterech próbek poddanych działaniu cieczy kwasującej, w której nie doszło do utworzenia kanałika robaczkowego. W związku z tym nie zaobserwowano większych zmian w strukturze porowej próbki po eksperymencie. Pustki w skale rozłożone są nierównomiernie i ta uwaga dotyczy wszystkich klas. W sieci porowej próbki A przeważają drobne obiekty z klas I–III. Mimo to główny udział w całkowitej porowatości próbki Kp_{CT} , mają mniej liczne klasy V–VII (około 60%).

Tabela 4. Próbka B – analiza przestrzeni porowej

Table 4. Sample B – pore space analysis

Pomiar I		
	Obraz 3D próbki	Obraz 3D próbki – rozmieszczenie porów w matrycy
Pomiar II		
	Obraz 3D próbki	Obraz 3D próbki – rozmieszczenie porów w matrycy

Próbka B

Kanalik utworzony w próbce B (tabela 4) cechuje się największą objętością ($373,14 \text{ mm}^3$). Jego długość wynosi $38,83 \text{ mm}$, a średnica ekwiwalentna $8,93 \text{ mm}$. Porowatość próbki Kp_{CT} wzrosła po kwasowaniu z $0,52\%$ do $2,81\%$. Odnotowano także znaczący wzrost przepuszczalności – z $0,47 \text{ mD}$ do $2587,47 \text{ mD}$. Klasyfikacje objętościowe pokazują, że zarówno przed eksperymentem, jak i po nim w próbce liczebnie dominują najmniejsze obiekty z klas I–II. Przed kwasowaniem główny udział w porowatości miały obiekty klas III do VI, a w klasie VII nie zanotowano żadnych obiektów. Po zabiegu natomiast głównym komponentem porowatości

$Kp_{CT}(85\%)$ stał się nowo utworzony kanalik zakwalifikowany do klasy VII. Utworzony kanalik robaczkowy składa się z 9349 gałęzi (kanalików porowych) połączonych 5596 węzłami (porami) (tabela 5). Przeważają gałęzie o długości nie większej niż $0,5 \text{ mm}$ i o średnim promieniu nie większym niż $0,2 \text{ mm}$. Wartości maksymalne tych parametrów wynoszące około $4,5 \text{ mm}$ dla długości i około $1,8 \text{ mm}$ dla średniego promienia, występują w pojedynczych przypadkach. Liczba koordynacyjna, podana dla każdego węzła, określająca liczbę gałęzi (kanalików) połączonych z jednym węzłem (porem), zmienia się od 1 do 24 z przewagą wartości z przedziału $1\text{--}3$.

Tabela 5. Próbką B – obraz kanałika robaczkowego po procesie szkieletyzacji (paleta barwna odzwierciedla zmiany wybranych parametrów)
Table 5. Sample B – image of the wormhole channel after skeletonization process (colour palette reflects changes in selected parameters)

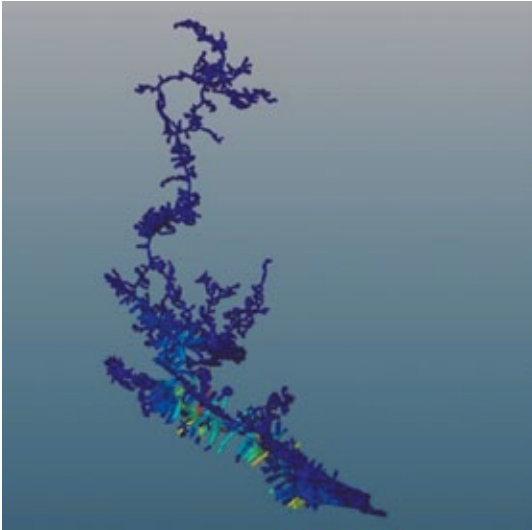
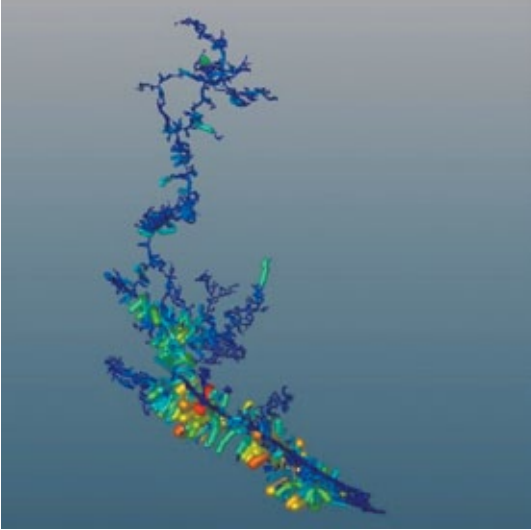
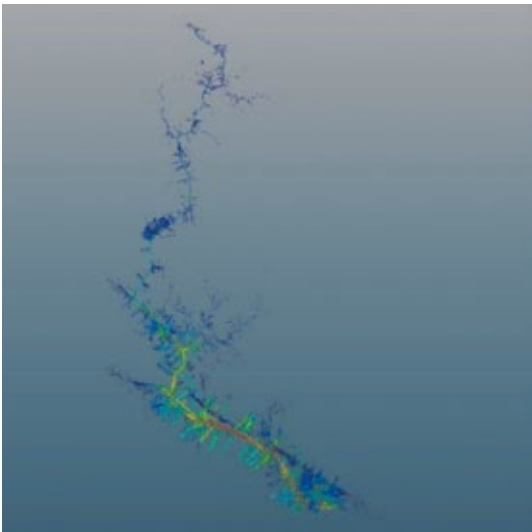
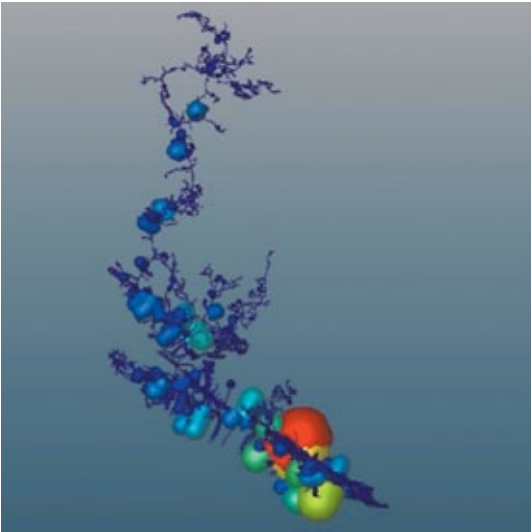
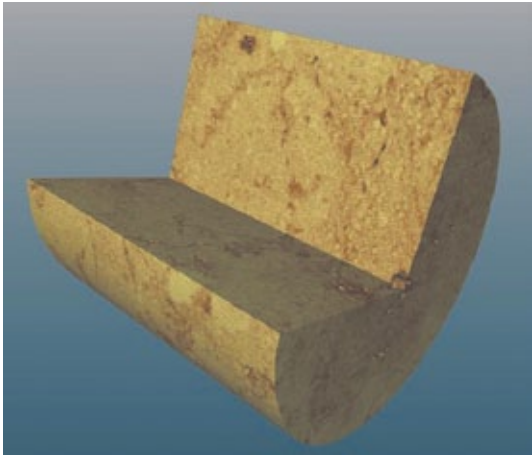
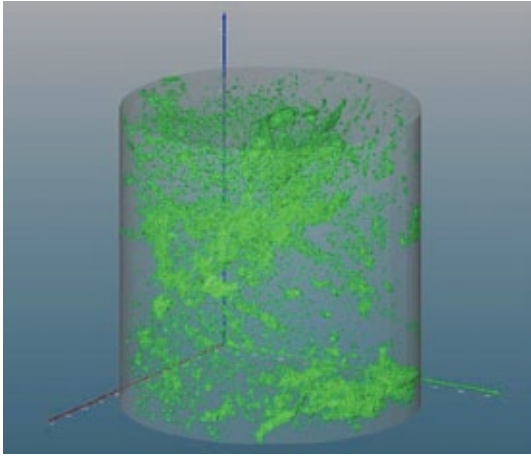
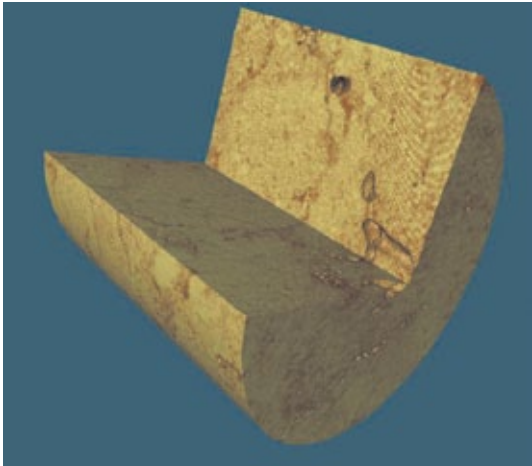
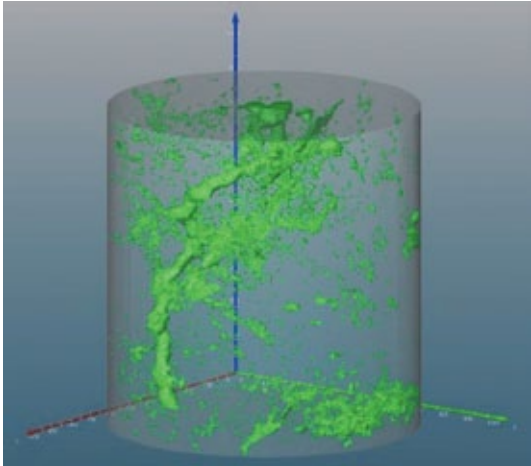
 0.898613 1.25854e+6	 1 191
Objętość gałęzi	Długość gałęzi (mierzona po krzywiźnie)
 0.5 74.5	 1 65
Średni promień gałęzi	Krętość gałęzi

Tabela 6. Próbka C – analiza przestrzeni porowej

Table 6. Sample C – pore space analysis

Pomiar I		
	Obraz 3D próbki	Obraz 3D próbki – rozmieszczenie porów w matrycy
Pomiar II		
	Obraz 3D próbki	Obraz 3D próbki – rozmieszczenie porów w matrycy

Próbka C

Prędkość przepływu cieczy kwasującej przez próbkę C (0,6 cm/min) okazała się optymalna, ponieważ ilość cieczy niezbędnej do przebicia próbki była najmniejsza (tabela 2). Utworzony pod wpływem kwasowania kanalik charakteryzuje się objętością 69,99 mm³, długością 28,18 mm oraz średnicą ekwiwalentną 5,11 mm. Porowatość próbki Kp_{CT} wzrosła z 0,85% do 1,02%, natomiast przepuszczalność – z 0,33 mD do 1100,83 mD. Niewielka liczba gałęzi budujących kanalik (1938) oraz stosunkowo wysoka liczba Eulera (−596) świadczą o nieskomplikowanej budowie kanalika. Oznacza to, że na

skutek zabiegu kwasowania powstał przede wszystkim główny kanalik, a ciecz kwasująca nie była zużywana na tworzenie bocznych, nieproduktywnych rozgałęzień. Podział pustek na klasy pokazuje, że klasa VII pojawia się dopiero po kwasowaniu jako kanalik robaczkowy, stanowiący 65,4% całkowitej porowatości Kp_{CT} . Długość gałęzi zawiera się w przedziale 0,049–2,74 mm, natomiast ich średni promień zmienia się od 0,01 mm do 0,73 mm. Liczba koordynacyjna w większości przypadków nie jest większa od 4. Krętość gałęzi najczęściej nie przekracza 2.

Tabela 7. Próbką C – obraz kanalika robaczkowego po procesie szkieletyzacji (paleta barwna odzwierciedla zmiany wybranych parametrów)
Table 7. Sample C – image of the wormhole channel after skeletonization process (colour palette reflects changes in selected parameters)

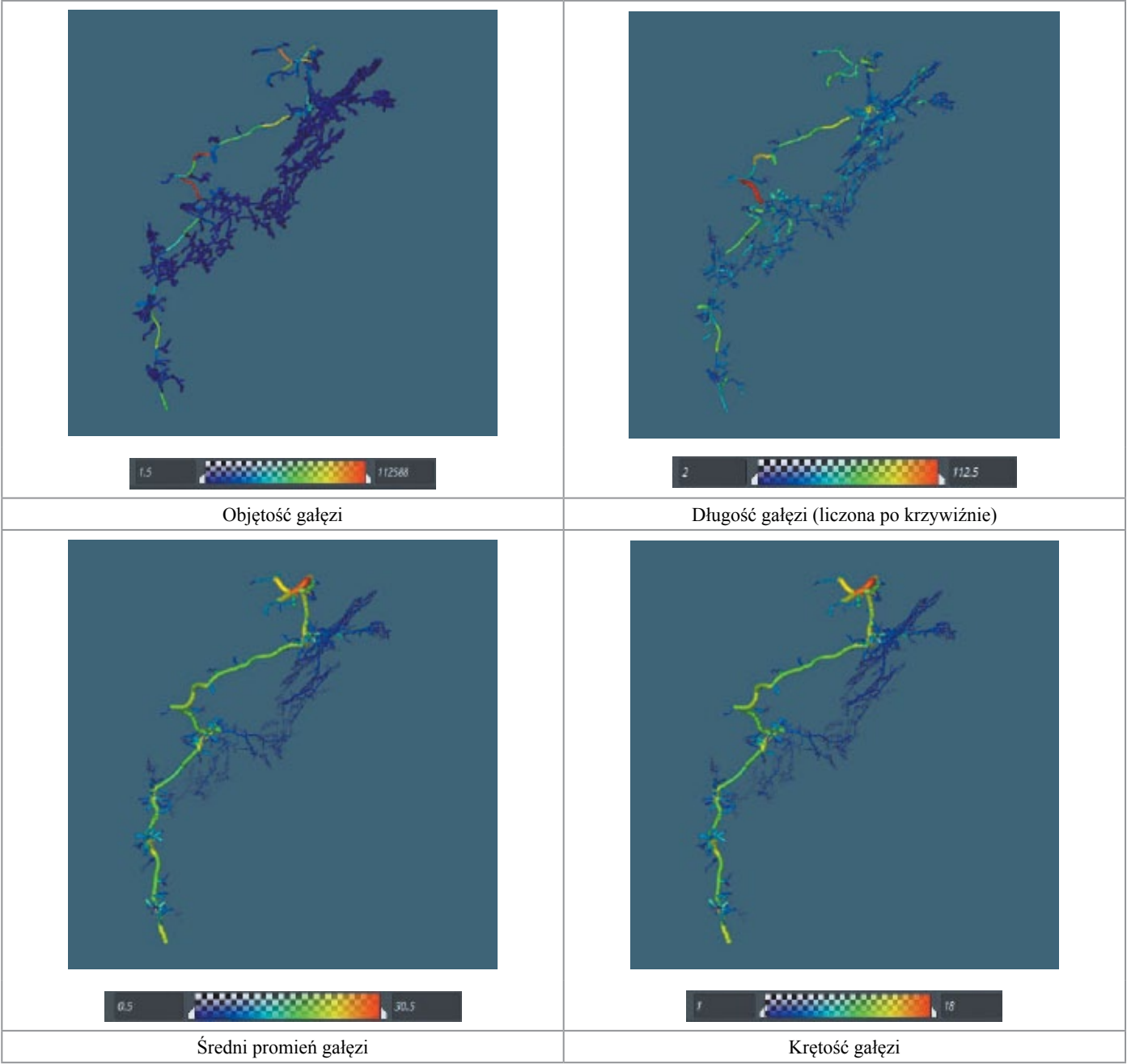
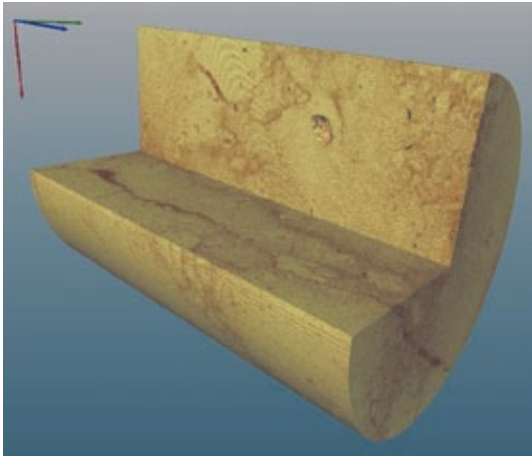
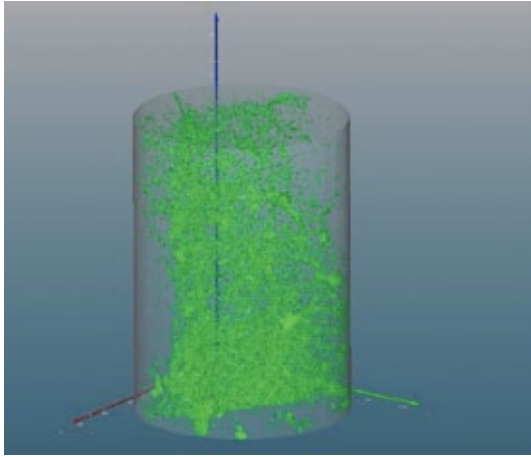
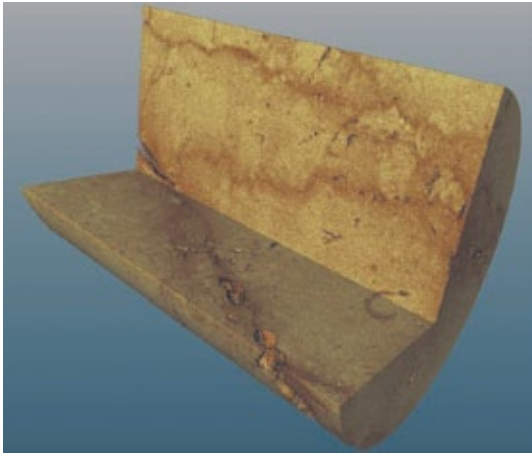
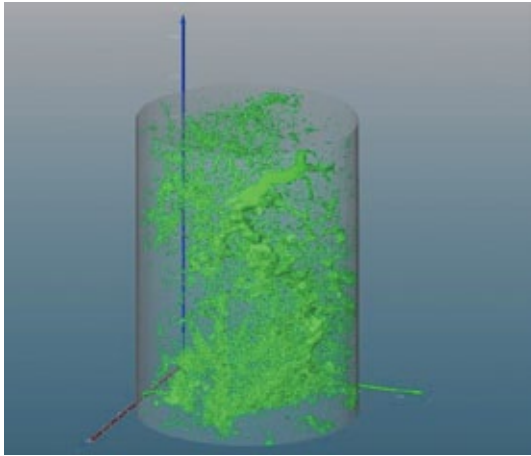


Tabela 8. Próbka D – analiza przestrzeni porowej

Table 8. Sample D – pore space analysis

Pomiar I		
	Obraz 3D próbki	Obraz 3D próbki – rozmieszczenie porów w matrycy
Pomiar II		
	Obraz 3D próbki	Obraz 3D próbki – rozmieszczenie porów w matrycy

Próbka D

Utworzony w próbce D kanalik cechuje się objętością 95,37 mm³, długością wynoszącą 38,61 mm i średnicą ekwiwalentną 5,67 mm. Po zabiegu kwasowania zaobserwowano wzrost porowatości Kp_{CT} od wartości 0,92% do 1,17% oraz znaczący wzrost przepuszczalności – od 0,34 mD do 1079,33 mD. Podobnie jak w poprzednich próbkach, także w tej licznie przeważają mniejsze pory z klas I–III. Obiekt występujący przed kwasowaniem w klasie VII po zabiegu kwasowania znacznie się zwiększył i przybrał formę kanalika, a jego udział w całkowitej Kp_{CT} wzrósł z 27,5% do ponad 50%. Liczba

gałęzi składających się na kanalik wynosi 29 991, a liczba łączących je węzłów 13 526. Maksymalna długość gałęzi wynosi 1,79 mm; przeważają jednak segmenty o długości z zakresu 0,10–0,20 mm. Zdecydowana większość gałęzi charakteryzuje się średnim promieniem w granicach 0,01–0,06 mm; liczba koordynacyjna zmienia się od 1 do 250 z przewagą wartości z przedziału 1–10.

Tabela 9. Próbką D – obraz kanałika robaczkowego po procesie szkieletyzacji (paleta barwna odzwierciedla zmiany wybranych parametrów)

Table 9. Sample D – image of the wormhole channel after skeletonization process (colour palette reflects changes in selected parameters)

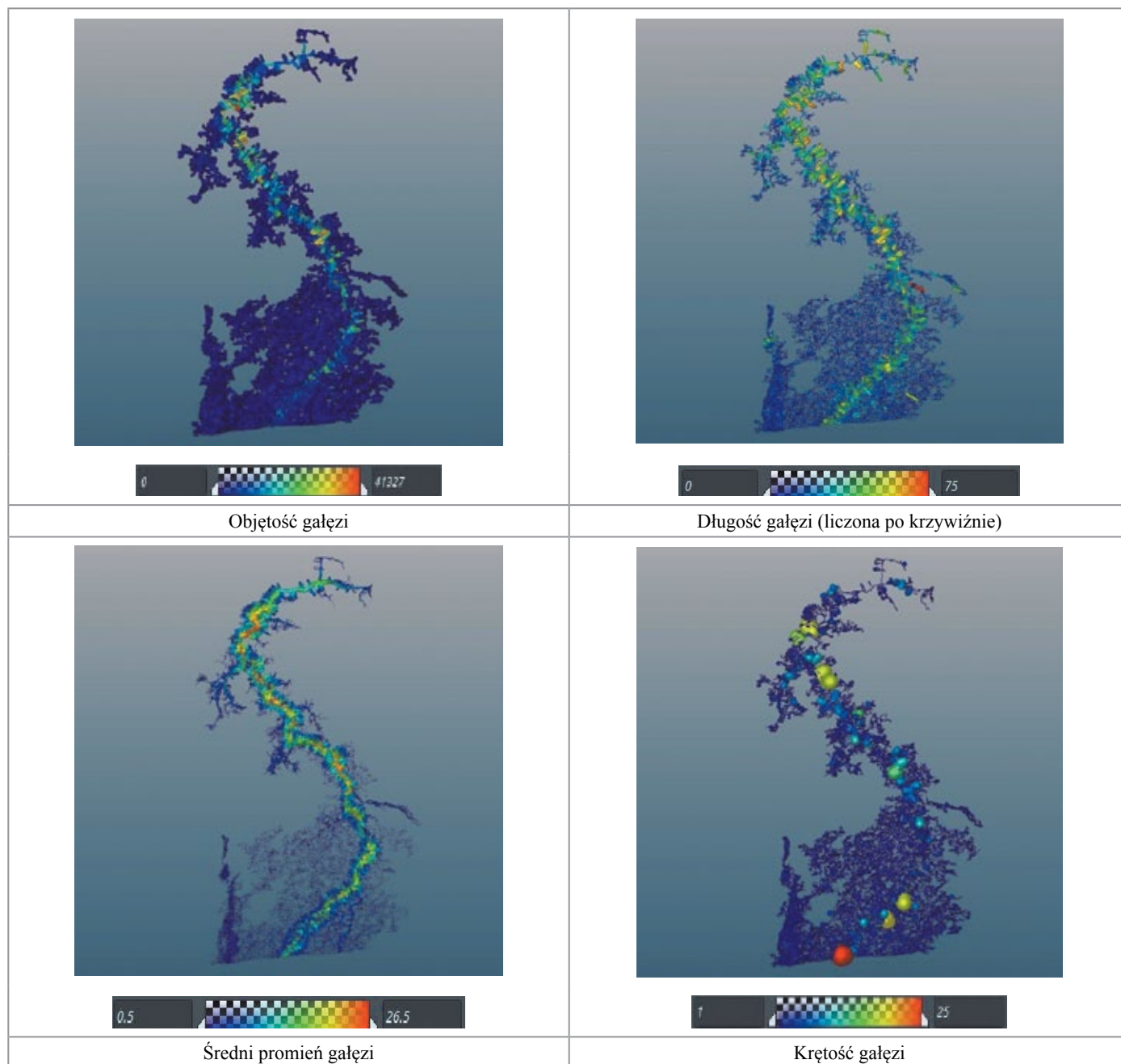
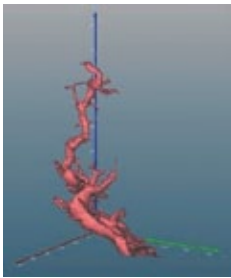
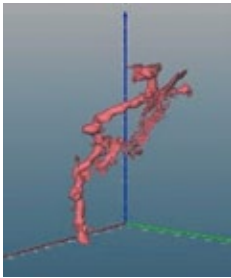
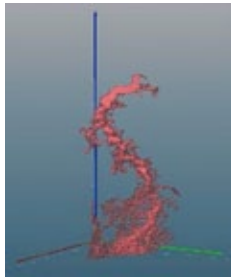


Tabela 10. Wybrane parametry kanalików robaczkowych w próbkach: B, C i D**Table 10.** Selected parameters of the wormhole channels in the samples: B, C and D

PARAMETR	B ($V_i - 0,45$ cm/min)	C ($V_i - 0,60$ cm/min)	D ($V_i - 1,01$ cm/min)
			
Objętość [mm ³]	373,14	69,99	95,37
Długość [mm]	38,83	28,18	38,61
Liczba gałęzi	9349,00	1938,00	29 991,00
Liczba połączeń	4990,00	1089,00	13 526,00
Średni promień gałęzi [mm]	0,14 (max. 1,82)	0,10 (max. 0,73)	0,04 (max. 0,64)
Krętość gałęzi	1,00–65,01 (śr. 1,29)	1,00–17,53 (śr. 1,25)	1,00–25,15 (śr. 1,20)
Liczba koordynacyjna	1–24 (śr. 3)	1–47 (śr. 3)	1–250 (śr. 4)
Liczba Eulera	–3782,00	–596,00	–15 529,00

Podsumowanie

Jednym z kluczowych parametrów mających wpływ na powstające po kwasowaniu kanalików robaczkowe jest prędkość przepływu cieczy kwasującej. Zbyt wolne zatłaczanie sprawia, że płyn nie wnika w głąb formacji, a tylko rozpuszcza czoło próbki, z kolei zbyt szybkie zatłaczanie powoduje powstawanie dużej liczby rozgałęzień odchodzących od kanalik głównego. Najlepsze efekty, czyli największy wzrost wielkości przepuszczalności w stosunku do ilości zatłaczanego płynu, są uzyskiwane wtedy, gdy powstaje długi główny kanalik o jak najmniejszej liczbie rozgałęzień.

W wyniku zabiegów kwasowania wykonanych w ramach eksperymentu w trzech próbkach zaobserwowano powstanie kanalików robaczkowych i związany z tym znaczący wzrost przepuszczalności. Nie zanotowano natomiast zmian w składzie mineralnym ani wyraźnego zwiększenia porowatości, które świadczyłyby o rozpuszczaniu węglanów. Jest to najprawdopodobniej związane z procesem rekrystalizacji węglanów rozpuszczonych w wyniku przepływu cieczy w przestrzeni porowej otaczającej powstałe kanaliki. W dwóch próbkach, w których powstały kanaliki o dużej liczbie rozgałęzień, odnotowano duże wartości liczby objętości porowych cieczy kwasującej niezbędnych do przebicia. Natomiast w próbce C, gdzie zaobserwowano kanalik o nieskomplikowanej budowie, bez nadmiernej liczby rozgałęzień, wartość tego parametru była najmniejsza.

Obraz tomograficzny jednoznacznie potwierdza wyniki zabiegów kwasowania. Wyniki testów przepływowych na

rdzeniach powiązane z parametrami struktury porowej uzyskanymi na podstawie obrazu CT mogą być wykorzystywane jako dane wejściowe do wykonania projektów i symulacji zabiegów matrycowego kwasowania w formacjach węglanowych. Przeprowadzone badania wyraźnie potwierdziły przydatność rentgenowskiej tomografii komputerowej w przygotowaniu technologii zabiegów kwasowania.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt. *Wykorzystanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w analizie zmian zachodzących w strukturze skał węglanowych po zabiegach kwasowania*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0049/SW/2024, nr archiwalny SW-4101-0099/2024.

Literatura

- Cooper M.P., Sharma R.P., Magni S., Blach T.P., Radliński A.P., Drabik K., Tengattini A., Szymczak P., 2023. 4D tomography reveals a complex relationship between wormhole advancement and permeability variation in dissolving rocks. *Advances in Water Resources*, 175(4): 104407. DOI:10.1016/j.advwatres.2023.104407.
- Czupski M., Kasza P., 2017. Zabiegi kwasowania w stymulacji wydobywania z odwiertów – projektowanie oparte na badaniach laboratoryjnych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*, 218: 1–144.
- Daefller Ch.S., del Valle J.F., Kariampally J., Elkhoury J.E., Max N., Panga M., 2018. Improving Wormholing Efficiency in Carbonates with a Novel System Based on Hydrochloric Acid. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI:10.2118/189540-MS.
- Kowalska S., 2013. Określanie ilościowego składu mineralnego skał zawierających minerały ilaste metodą Rietvela. *Nafta-Gaz*, 69(12): 894–902.
- Li W., Einstein H.H., Germaine J.T., 2019. An experimental study of matrix dissolution and wormhole formation using gypsum core

- flood tests: 1. Permeability Evolution and Wormhole Geometry Analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 11055–11073. DOI: 10.1029/2018JB017238.
- Lucas C.R. dos S., Neyra J.R., Araújo E.A., da Silva D.N.N., Lima M.A., Ribeiro D.A.M., Pandava Aum P.T., 2023. Carbonate acidizing – A review on influencing parameters of wormholes formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 220, Part A: 111168. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
- Urgel-Pinto R., Alcázar-Vara L.A., 2024. Microstructural analysis applied to carbonate matrix acidizing: An overview and a case study. *Micron*, 187. DOI: 10.1016/j.micron.2024.10372.
- Yoo H., Kim Y., Jang H., Lee J., 2021. Propagation characteristics of optimum wormhole in carbonate matrix acidizing using micro X-ray CT imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196(1): 108010. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108010.
- Zalewska J., Dohnalik M., Kaczmarczyk J., Masłowski M., Biały E., 2010. Wizualizacja kanałków robaczkowych, wywołanych zabiegiem kwasowania rdzeni wiertniczych, uzyskana metodą mikrotomografii rentgenowskiej. *Nafta-Gaz*, 66(9): 774–781.
- Zalewska J., Dohnalik M., Poszytek A., 2009. Wizualizacja i analiza przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 161: 1–83.



Dr inż. Marek CZUPSKI
 Adiunkt, Kierownik Zakładu Symulacji Wydobycia
 Węglowodorów
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: marek.czupski@inig.pl



Mgr inż. Katarzyna DRABIK
 Główny specjalista inżynierijno-techniczny
 w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: katarzyna.drabik@inig.pl



Mgr Anna PRZELASKOWSKA
 Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
 Geofizyki Wiertniczej
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: anna.przelaskowska@inig.pl