

Łukasz Kaczmarek

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

Grzegorz Machowski

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

Michał Maksimczuk, Tomasz Wejrzanowski

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej

Strukturalna analiza mioceńskich piaskowców z zapadliska przedkarpacciego za pomocą wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej

Artykuł przedstawia wyniki wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej w analizie strukturalnej oraz ilościowej przestrzeni porów i szczelin w piaskowcach mioceńskich. Dodatkowo wykonano badanie przepuszczalności analizowanych skał. Próbkę zostały pobrane z odwiertu S-3, zlokalizowanego we wschodniej części zapadliska przedkarpacciego. W celu przeprowadzenia badania wykonano dwie serie naświetlania rentgenowskiego próbek. Pierwszy zestaw próbek został wytypowany dla uzyskania przestrzennego rozkładu ziaren, porów oraz szczelin. Długość boku woksela (tzn. najmniejszego elementu objętości) w tym etapie badań wynosiła około 26 μm . Drugi zestaw naświetlania został wykonany dla zobrazowania elementów strukturalnych o wielkościach od około 3 μm do 26 μm oraz cech petrofizycznych. Wynikiem przeprowadzonych badań jest charakterystyka analizowanych skał, która umożliwia podział próbek na dwie grupy. Pierwsza grupa próbek posiada cechy strukturalne oraz petrofizyczne typowe dla skał złóż konwencjonalnych, natomiast druga grupa – dla skał złóż typu niekonwencjonalnego. Właściwe rozpoznanie parametrów petrofizycznych każdego typu złoża stanowi kluczowy element optymalizacji procesu jego udostępniania.

Słowa kluczowe: piaskowce, wysokorozdzielcza mikrotomografia komputerowa, zapadlisko przedkarpaccie, miocen.

The use of high-resolution X-ray computed microtomography in the structural analysis of the Miocene sandstones of the Carpathian Foredeep

The article presents results of high-resolution computed microtomography use in the structural analysis and quantification of pores and fractures in Miocene sandstones. Furthermore, the permeability studies of rocks were performed. Miocene samples were taken from well S-3, located in the eastern part of the Carpathian Foredeep. For the aforementioned analysis two series of X-ray irradiation were performed. The first set of samples was selected to obtain the spatial distribution of grains, pores and fractures. At this stage of the study, the length of the voxel side amounted to approx. 26 μm . The second set of X-ray exposure was performed to reveal structural elements and petrophysical characteristics of sizes ranging from approx. 3 μm to 26 μm . The result of performed characteristics is the division of samples into two groups. The first group of samples has structural and petrophysical features of rocks typical for conventional reservoir deposits, while the second – for the unconventional type. Appropriate identification of petrophysical parameters of the formation is a key element for the optimization of the reservoir development.

Key words: sandstones, high-resolution computed microtomography, Carpathian Foredeep, Miocene.

Wstęp

Rejon Karpat i zapadliska przedkarpackiego jest miejscem najdłuższej eksploatacji złóż węglowodorów w Polsce. W ostatnich latach szczególnym zainteresowaniem cieszą się obszary występowania złóż konwencjonalnych oraz niekonwencjonalnych odznaczających się, w pewnym uproszczeniu, hybrydowym systemem przestrzeni porowej, co rzutuje na inną strukturę wewnętrzną skały, jej porowatość, a zwłaszcza na przepuszczalność. Wpływa to bezpośrednio na właściwości zbiornikowe i filtracyjne górotworu. Z tego powodu w przypadku skał złóż niekonwencjonalnych wymagane są często specjalne zabiegi udostępniania (np. szczelinowanie). Dobrym przykładem niekonwencjonalnych złóż typu *tight* są piaskowce, posiadające ziarnistą strukturę, którą można poddać analizie z wykorzystaniem wysokorozdzielczej mikrotomografii

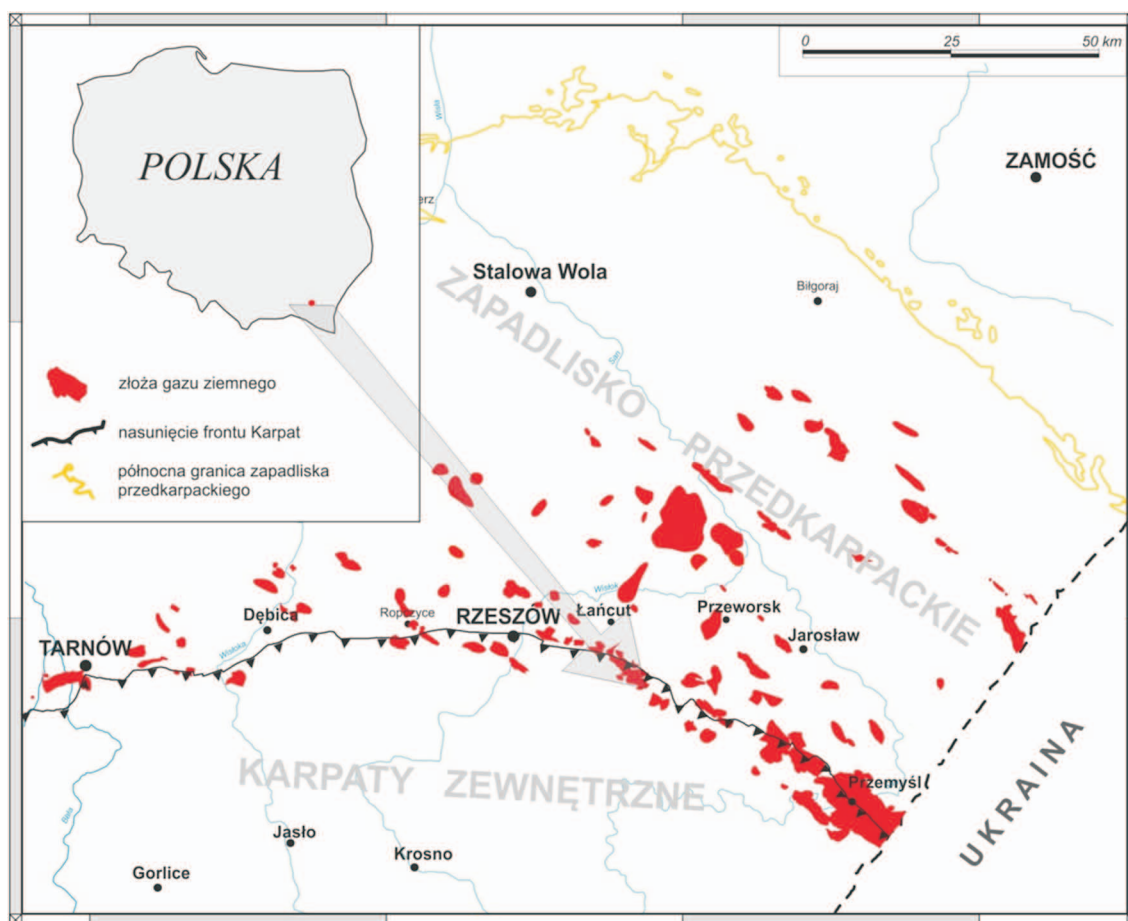
komputerowej. Ta nieniszcząca i nieinwazyjna technika pozwala na uzyskanie trójwymiarowego modelu struktury próbki oraz umożliwia wyznaczenie niektórych jej cech petrofizycznych.

W niniejszym artykule została przedstawiona strukturalna analiza silikoklastycznych osadów miocenu z zapadliska przedkarpackiego, które stanowią potencjalne konwencjonalne i niekonwencjonalne złoża gazu ziemnego. Dokładny opis przebadanych próbek obejmuje również charakterystykę ilościową porowatości, szczelinowatości oraz uwarstwienia. Dodatkowo wyniki badań tomograficznych zostały uzupełnione o analizę przepuszczalności. Analizy struktury zostały wykonane na podstawie trójwymiarowych obrazów budowy wewnętrznej próbek, które zostały poddane numerycznemu przetwarzaniu.

Obiekt badań

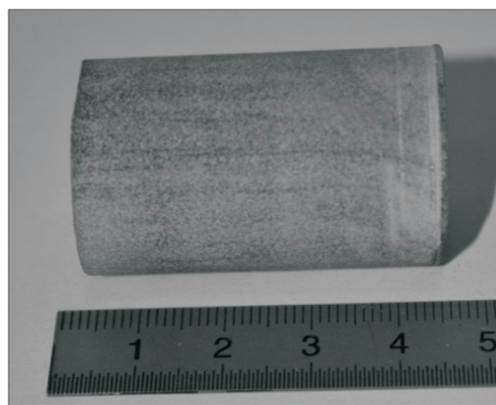
Obiektem szczegółowych badań było 7 próbek piaskowców reprezentujących utwory miocenu autochtonicznego (sarmat) wschodniej części zapadliska przedkarpackiego pod nasunięciem karpackim (rysunek 1). Próbki zostały pobrane

z odwiertu S-3, zlokalizowanego w południowo-wschodnim obrzeżeniu pola gazowego Husów (obecnie PMG) – z interwałów 1768÷1777 m (jedna próbka nr 6) oraz 1917÷1926 m (6 próbek nr 1÷5 i 7). Utwory sarmatu w tej strefie zapadliska



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle rozkładu złóż gazu ziemnego w rejonie zapadliska przedkarpackiego i frontu nasunięcia Karpat (według [3], zmodyfikowany)

przedkarpackiego przykryte są utworami płaszczowiny skolskiej i jednostki zgłobickiej. Analizowane piaskowce (rysunek 2) reprezentują osady silikoklastyczne, drobno- i średnioziarniste (frakcja psamitowa i aleurytowa), wchodzące w skład facji heterolitowej, której charakterystyczną cechą jest występowanie cienkoławicowych przewarstwień piaskowca, pyłowca i mułowca [10]. Facja heterolitowa w przypadku korzystnych warunków strukturalnych jest nierzadko miejscem występowania przemysłowych akumulacji gazu ziemnego [6]. Obecność metanu w wielohoryzontowych zbiornikach heterolitów, wykazujących słabe własności pojemnościowe i filtracyjne, sugeruje warunki, w których skała macierzysta dla gazu jest w znacznej części skałą zbiornikową [10], typu niekonwencjonalnego.



Rys. 2. Analizowana próbka nr 1 piaskowca mioceńskiego z zapadliska przedkarpackiego

Metodyka badań

Podstawową zasadą, na której opiera się technika mikrotomografii, jest różnica liniowego współczynnika absorpcji promieniowania rentgenowskiego ziaren oraz cząstek badanego materiału. Na przykład jeżeli część ziaren w piaskowcu ma dużą gęstość lub liczbę atomową pierwiastków składowych w stosunku do pozostałych, uzyskiwany jest wtedy klarowny obraz, pozwalający na wyodrębnienie poszczególnych elementów strukturalnych próbek. Badanie wykonywane w mikrotomografie polega na naświetlaniu stopniowo obracającej się o kąt 360° próbki wokół własnej osi z jednoczesnym rejestrowaniem przechodzącego promieniowania za pomocą detektora CCD ze specjalną powłoką scyntylacyjną, pozwalającą na przetworzenie intensywności promieniowania na sygnał elektryczny i zapis w formie cyfrowej za pomocą wielu projekcji. Otrzymane projekcje próbki są składane do obrazu trójwymiarowego, a następnie obraz ten dzielony jest na poprzeczne obrazy (przekroje), zapisywane w formie bitmapy, oddzielone o długość boku woksela (tzw. trójwymiarowy piksel). Ostatnią fazą badania mikrotomograficznego jest wykonanie analizy obrazu oraz obliczeń numerycznych dotyczących parametrów badanego materiału. Warto podkreślić, że jakość otrzymanego obrazu oraz możliwość uzyskania powiększenia zależne są przede wszystkim od wielkości próbki, ponieważ w uogólnieniu większa droga przejścia promieni rentgenowskich, wyższa gęstość i grubość materiału badawczego powodują słabszą jakość i czytelność obrazu uzyskiwanego w mikrotomografie. Związane jest to ze zmniejszoną ilością promieniowania rejestrowanego przez detektor. Dalsze szczegółowe informacje, dotyczące m.in. procesów fizycznych zachodzących podczas naświetlania próbki oraz zasady działania mikrotomografu, zostały opisane w literaturze [1, 2, 7]. Natomiast wyniki analiz z wykorzystaniem mikrotomografii dla skał z obszaru Polski można znaleźć m.in. w [5, 8, 12, 13].

Przeprowadzona analiza mikrotomograficzna składała się z czterech etapów. Pierwszym było wytypowanie zestawu 6 walcowych próbek (opisywanych wcześniej) oraz odcięcie drobnych fragmentów o wysokości $3\div 4$ mm z każdej próbki (drugi zestaw próbek). Drugi etap procedury badawczej dotyczył uzyskania radiografów z naświetlania w mikrotomografie próbek pierwszej, a następnie drugiej serii. Pierwsza seria próbek była przeznaczona do uzyskania obrazów całych próbek i dzięki temu przestrzennego ułożenia struktury. Dzięki drugiemu zestawowi próbek otrzymano lepszej jakości obraz, pozwalający na określenie porów powyżej $5\ \mu\text{m}$. Ostatnim etapem było przeprowadzenie parametryzacji opisu przebadanych próbek, m.in. wyznaczenie zakresów średnic występujących przestrzeni pustych, dodatkowa analiza numeryczna określenia głównego kierunku przepływu oraz wykonanie laboratoryjnych badań przepuszczalności, w celu przypisania poszczególnym próbkom typu konwencjonalnego lub niekonwencjonalnego.

Naświetlania zostały wykonane wolframową lampą rtg Hamamatsu L8121-03, chłodzoną powietrzem. Generowane promieniowanie posiadało geometrię stożkową. Napięcie lampy rtg w przypadku pierwszej serii miało wartość od 130 kV do 140 kV, natomiast dla drugiej serii – od 80 kV do 100 kV. Czas naświetlania pojedynczego zdjęcia wynosił około 4,5 s, przy całkowitym czasie naświetlania próbki równym 2,5 godziny (1201 projekcji). Rezultatem naświetleń był obraz o rozdzielczości 1024×1024 , z wokselem o boku wielkości około $25\ \mu\text{m}$ dla pierwszego zestawu oraz $5\ \mu\text{m}$ dla drugiej serii próbek. Po otrzymaniu obrazu w formacie bitmapy (BMP) wykonano analizę struktury, a następnie przeprowadzono binaryzację obrazu (metodą progowania), czyli przypisanie informacji na temat tego, które elementy stanowią pory, a które ziarna piaskowca czy też ich spoiwo. Do przetworzenia uzyskanych radiografów

oraz wykonania obliczeń numerycznych wykorzystane zostały programy SkyScan i Avizo 8.0.

Badania gazoprzepuszczalności realizowano na próbkach cylindrycznych w kierunku osiowym. Pomiar polegał na umieszczeniu próbki w pierścieniu gumowym, który zabezpieczał przed migracją gazu na boki, i na pomiarze czasu przepływu określonej ilości sprężonego gazu (azotu) podanego ciśnieniu naporowemu. W celu zablokowania próbki w osłonie – z dołu i z góry działały na nią metalowe cylindry, ściskane naprężeniem około 2÷3 MPa. Ze względu na odblokowywanie się porów skały w trakcie poddawania jej ciśnieniu naporowemu – pomiar rozpoczynano po ustabilizowaniu się przepływu. Czas stabilizacji wynosił około

5÷15 min. Wartość współczynnika gazoprzepuszczalności k_{prz} określana była ze wzoru (1).

$$k_{prz} = \frac{2 \cdot Q \cdot p_0 \cdot \eta \cdot L}{(p_1^2 - p_0^2) \cdot S} \cdot 1000 \quad (1)$$

gdzie (w układzie CGS):

Q – wydatek gazu [cm^3/s],

p_0 – ciśnienie atmosferyczne (za próbką) [at],

p_1 – ciśnienie gazu w układzie (przed próbką) [at],

η – lepkość dynamiczna gazu [cP],

L – długość próbki [cm],

S – przekrój poprzeczny próbki [cm^2].

Wyniki badań

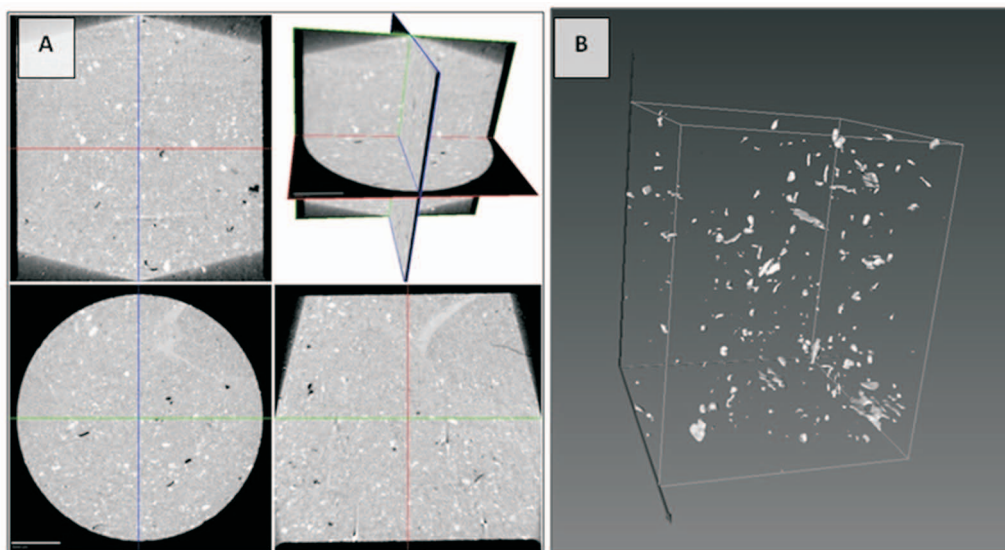
Charakterystykę strukturalną badanych piaskowców rozpoczęto od wizualizacji budowy wewnętrznej próbek. Na rysunku 3 został przedstawiony średnioziarnisty piaskowiec w różnych przekrojach (A) wraz z wizualizacją przestrzennego rozłożenia porów (B). Rysunek 3A dobrze obrazuje takie cechy jak kształt, obtoczenie i rozkład ziaren w całej próbce. Warto dodać, że brak równoległości na jednym z przekrojów na obrazach mikrotomograficznych jest zniekształceniem spowodowanym brakiem kształtu idealnego walca.

Kolejne przekroje przedstawiają strukturę próbek nr 3 i 6 (rysunek 4). W przypadku próbki nr 3 (rysunek 4A) ziarna średnioziarnistego piaskowca są dobrze rozpoznawalne, podobnie jak występujące w tym przypadku pory. Taki rezultat był możliwy dzięki naświetleniu mniejszego fragmentu próbki i w konsekwencji otrzymaniu dokładniejszego obrazu

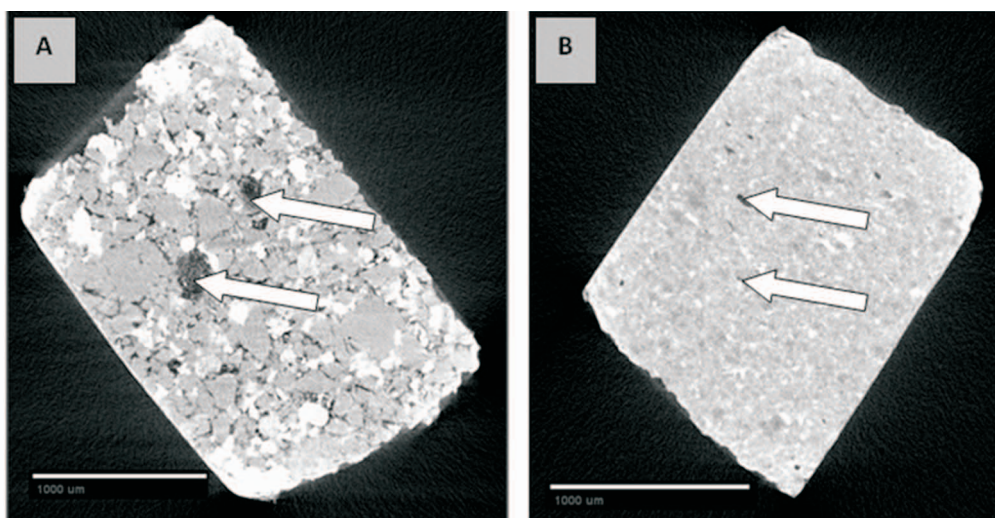
(mniejszego woksela). Natomiast w próbce nr 6 (rysunek 4B) pomimo zwiększenia dokładności kontury ziaren są słabo widoczne, przy dobrze rozpoznawalnych większych porach.

Kolejne zestawienie pokazuje obrazy otrzymane z największą dokładnością (długość boku woksela około 2 μm). Pomimo zauważalnej różnicy wielkości ziaren w próbce nr 1 piaskowca średnioziarnistego (rysunek 5A) oraz próbce nr 4 piaskowca drobnoziarnistego (rysunek 5B) można przeanalizować kształt ziaren.

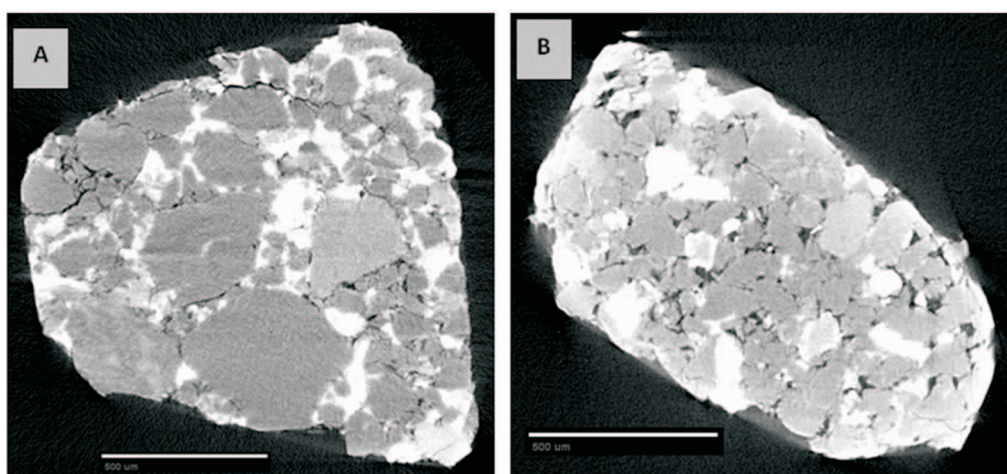
Rysunek 6 przedstawia piaskowiec drobnoziarnisty (próbka nr 2) mocno różniący się cechami strukturalnymi, w tym cechujący się marginalną obecnością większych porów. W tej próbce nie jest obecne uwarstwienie, obserwowane w pozostałych analizowanych drobnoziarnistych piaskowcach. Na rysunku 6B można zauważyć również bezładną strukturę ziaren i drobne pory.



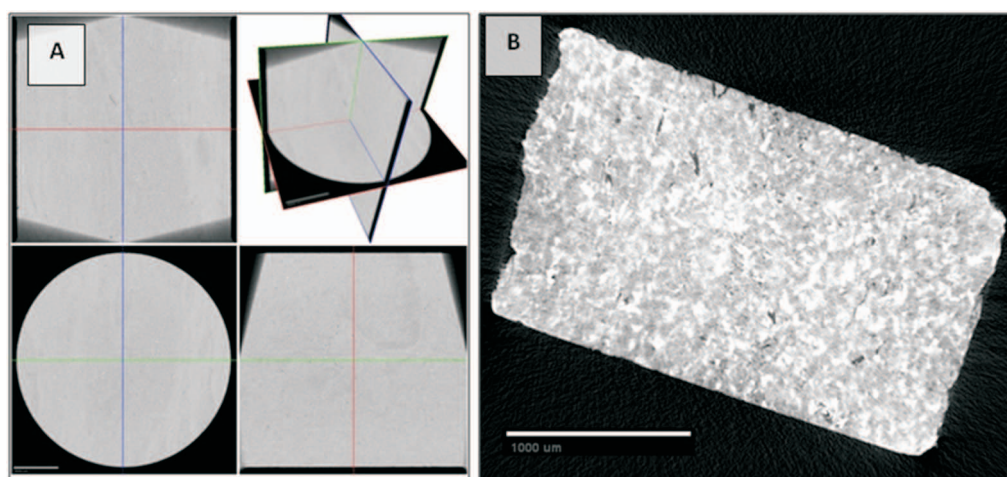
Rys. 3. Struktura wewnętrzna próbki nr 1 (długość boku woksela równa 26,7 μm):
A – różne przekroje próbki; B – przestrzenny rozkład porów



Rys. 4. Struktura wewnętrzna próbki nr 3 piaskowca średnioziarnistego oraz próbki nr 6 piaskowca drobnoziarnistego (długość boków woksela około 5 µm)



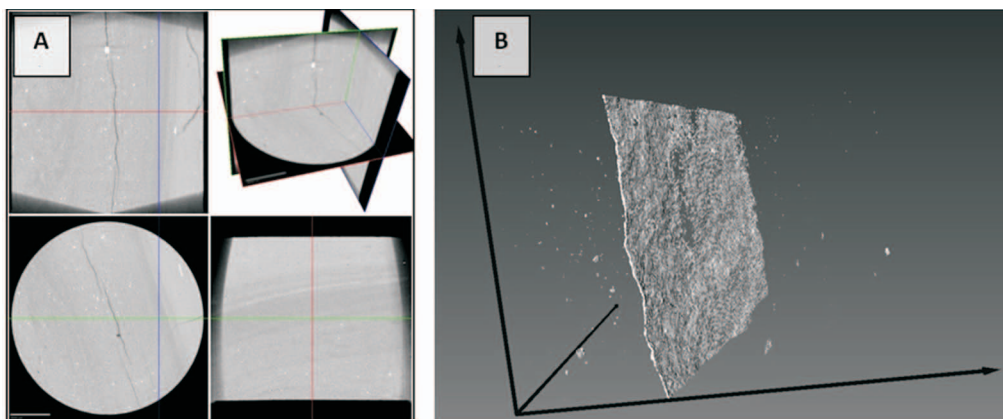
Rys. 5. Próbkę nr 1 i próbkę nr 4 na obrazie, którego długość woksela wynosi około 2 µm



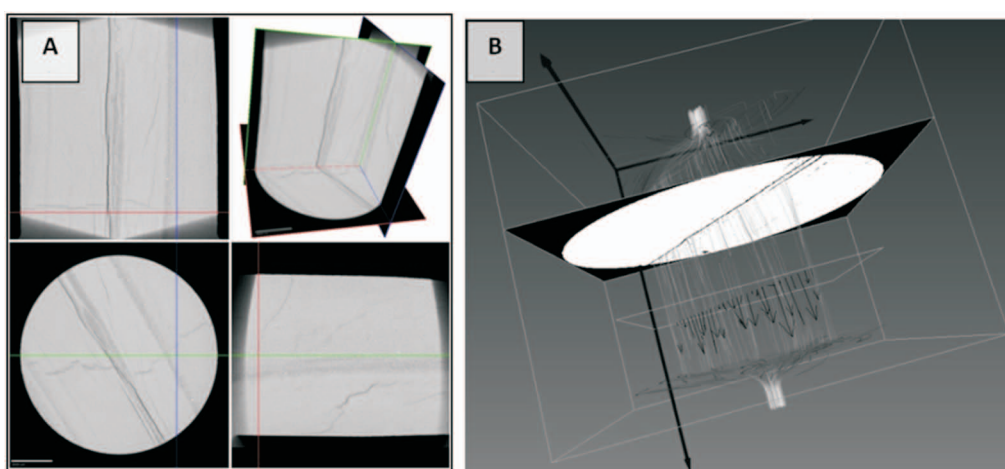
Rys. 6. Struktura wewnętrzna drobnoziarnistego piaskowca (próbka nr 2): A – różne przekroje próbek (bok woksela o długości 26,8 µm); B – przekrój przez fragment próbki (bok woksela o długości 4,8 µm)

Rysunek 7 prezentuje piaskowiec również o drobnoziarnistej strukturze, ale z obecnym warstwowaniem. Próbkę ta charakteryzuje się obecnością szczeliny zgodnej z kierunkiem warstwowania, której wizualizację przedstawiono na rysunku 7B.

Przedostatnia z analizowanych próbek (rysunek 8) oprócz drobnoziarnistej struktury posiadała system szczelin, z których jedna ciągnęła się przez całą próbkę. Charakter rozwarcia tej szczeliny był niejednorodny, z miejscowym



Rys. 7. Struktura wewnętrzna drobnziarnistego piaskowca (próbka nr 5):
A – różne przekroje próbki; B – wizualizacja powierzchni szczeliny



Rys. 8. Struktura wewnętrzna drobnziarnistego piaskowca (próbka nr 6):
A – różne przekroje próbki; B – numeryczna analiza głównych kierunków przepływu przez dominującą szczelinę w próbce

zanikaniem. W celu określenia głównego kierunku przepływu i sprawdzenia ciągłości pozostałych szczelin przeprowadzono numeryczną symulację przepływu cieczy. Na rysunku 8B można zauważyć, że wektory przepływu nie mają równej długości ani zwrotów, co świadczy o różnej ciągłości szczeliny na przekroju.

Wielkość porowatości oraz rozmiary porów są jednymi z kluczowych parametrów w klasyfikacji pojemnościowej skał zbiornikowych. Do oceny właściwości filtracyjnych wykorzystano analizę przepuszczalności. Łączne wyniki pozwalają na określenie typu analizowanych skał zbiornikowych. W tabelicy 1 przedstawiono wyniki analiz.

Ważnym elementem w procesie wyznaczania porowatości jest wielkość woksela, która daje informację o granicznej wielkości rejestrowanych elementów struktury próbki. W przypadku pierwszej serii próbek długość boku woksela wynosi około $26\ \mu\text{m}$ ($0,026\ \text{mm}$), co oznacza, że pory o średnicy mniejszej niż $26\ \mu\text{m}$ nie zostały zobrazowane. W przypadku konwencjonalnych skał zbiornikowych dominującą rolę w magazynowaniu węglowodorów pełnią pory charakteryzujące się większymi zakresami średnic. Piaskowce,

które mają bardzo dobre parametry zbiornikowe (np. utworzy eoliczne czerwonego spągowca), wykazują średnicę powyżej $20\ \mu\text{m}$ [11]. W literaturze [11] można również znaleźć informacje o wartości progowej średnicy porów dla niezerowej przepuszczalności, bliskiej $3\text{--}4\ \mu\text{m}$. Drugim kryterium tego typu skał jest przepuszczalność, której graniczną wartość przyjmuje się powyżej $0,1\ \text{mD}$ [4, 9]. Ze względu na bardzo mały rozmiar porów w artykule jako wartość graniczną ustalono $0,5\ \text{mD}$. Średni udział porów i szczelin o średnicy większej od $26\ \mu\text{m}$ wynosi $0,42\%$, natomiast większych od średnicy około $3\ \mu\text{m}$, a mniejszych od około $26\ \mu\text{m}$ – $2,69\%$. Średnia przepuszczalność przeanalizowanych próbek to $1,22\ \text{mD}$. W przypadku próbki nr 4 wyniki małej porowatości oraz stosunkowo wysokich przepuszczalności wynikających ze szczelinowatości świadczą o zamkniętej porowatości badanych skał.

Tabelica 2 przedstawia zestawienie opisu struktury omawianych piaskowców z dwóch grup analizowanych próbek. Pierwsza grupa (próbki nr 1, 3), reprezentująca skały zbiornikowe typu konwencjonalnego (o średniej porowatości całkowitej $5,74\%$ oraz średniej przepuszczalności $3,87\ \text{mD}$),

Tablica 1. Wyniki analizy wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej oraz badań przepuszczalności piaskowców mioceńskich

Numer próbki	Wyniki mikrotomografii komputerowej					Wyniki badania przepuszczalności
	Udział porów oraz szczelin ($\emptyset > l_v$) n' [%]	Długość boku woksela l_v' [μm]	Udział porów oraz szczelin we fragmentach próbek ($l_v > \emptyset > l_v$) n'' [%]	Długość boku woksela obrazu fragmentu próbki l_v'' [μm]	Sumaryczna porowatość na podstawie microCT ($\emptyset > l_v$) n [%]	k_{prz} [mD]
1	0,75	26,7	2,32	2,1	3,07	2,5108
2	0,04	26,8	1,62	4,8	1,66	0,1061
3	0,37	26,8	8,04	4,7	8,41	5,2256
4	0,01	26,7	6,22	2,1	6,23	0,4129
5	0,28	25,1	0,01	4,9	0,29	0,1791
6	1,07	26,8	0,19	4,8	1,26	–
7	0,40	25,0	0,41	4,7	0,45	0,1089

została wyznaczona na podstawie wielkości porów, porowatości oraz przepuszczalności. Druga grupa (próbki nr 2, 4, 5, 6, 7) została określona jako skały zbiornikowe o charakterze

niekonwencjonalnym (średnia porowatość całkowita 2,06% oraz średnia przepuszczalność 0,23 mD) z powodu małej wielkości porów oraz niskiej przepuszczalności.

Tablica 2. Opis struktury dwóch grup piaskowców

Nr grupy	Typ skały zbiornikowej	Fracja ziaren	Stopień selekcji	Obtoczenie ziaren	Kształt ziaren	Warstwowanie
1	konwencjonalny	psamitowa	niski	obtoczone	płasko wydłużone	brak
2	niekonwencjonalny	aleurytowa	wysoki	dobrze obtoczone	kuliste	w większości próbek występuje

Podsumowanie

Przeprowadzono analizę strukturalną oraz ilościową przetrzeni porów i szczelin mioceńskich drobno- i średnioziarnistych piaskowców z zapadliska przedkarpackiego, z wykorzystaniem wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej skorelowanej z wynikami pomiarów przepuszczalności. Wyniki analizy pozwoliły na podział próbek na 2 grupy, charakteryzujące się określoną porowatością, przepuszczalnością oraz strukturą. Próbki zaliczone do pierwszej grupy miały średnioziarnistą strukturę z obtoczonymi ziarnami o płasko wydłużonym kształcie, 5,74-proc. udział porów oraz przepuszczalność 3,87 mD. Druga grupa próbek cechowała się drobnoziarnistą strukturą, w większości warstwowaną, z obecnością szczelin.

Średnia porowatość całkowita dla tej grupy wyniosła 2,06%, natomiast średnia przepuszczalność była równa 0,23 mD.

Podsumowując, można stwierdzić, że analizowane próbki piaskowców mioceńskich reprezentują hybrydowy system skał zbiornikowych, wykazujących cechy charakterystyczne dla typu konwencjonalnego, jak i niekonwencjonalnego. Należy również podkreślić, że w prezentowanej pracy nie zostały przedstawione wyniki badań współwystępujących w profilu z piaskowcami skał mułowcowo-ilastych (facja heterolitowa), które również stanowią perspektywiczny poziom zbiornikowy typu niekonwencjonalnego i będą obiektem badań w najbliższym czasie.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 9, s. 647–654

Artykuł nadesłano do Redakcji 19.06.2015 r. Zatwierdzono do druku 14.07.2015 r.

Podziękowania. Prezentowane wyniki badań były finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (umowa nr PBS2/A2/16/2013, kierownik: dr Artur T. Krzyżak). Badania przepuszczalności zostały wykonane przez dr. hab. inż. P. Małkowskiego z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Autorzy dziękują PGNiG S.A. za udostępnienie próbek rdzeni wiertniczych.

Literatura

- [1] Baker D., Mancini L., Polacci M., Higgins M., Gualda G., Hill R., Rivers M.: *An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks*. Lithos 2015, vol. 148, pp. 262–276.
- [2] Cnudde V., Boone M.: *High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications*. Earth-Science Reviews 2013, vol. 123, pp. 1–17.
- [3] Gorecki W. (red.) et al.: *Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego*. Monografia. Katedra Surowców Energetycznych, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2012, s. 418.
- [4] Hadro J.: *Strategia poszukiwan złoz gazu ziemnego w lupkach*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 3, s. 250–258.
- [5] Kaczmarek L., Lukasiak D., Maksimczuk M., Wejrzanowski T.: *Wykorzystanie wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej oraz analizy ultradźwiękowej w charakterystyce struktury paleozoicznych gazonosnych lupkow z basenu bałtyckiego*. Nafta-Gaz 2015 (zaakceptowane do druku).
- [6] Karnkowski P.: *Złozta gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce, tom 2: Karpaty i zapadlisko przedkarpackie*. Kraków, Towarzystwo Geosynoptyków „GEOS”, 1993.
- [7] Ketcham R., Carlson W.: *Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences*. Computers & Geosciences 2001, vol. 27, pp. 381–400.
- [8] Lykowska G.: *Trojwymiarowa wizualizacja szczelin metoda mikrotomografii rentgenowskiej*. Nafta-Gaz 2012, nr 12, s. 959–964.
- [9] Naik G. C.: *Tight Gas Reservoirs – An Unconventional Natural Energy Source for the Future*. Association of Petroleum Geologists of India, 2005, http://pinedaleonline.com/socio-economic/pdfs/tight_gas.pdf (dostęp: maj 2015).
- [10] Paszkowski M., Porebski S. J., Warchol M.: *Koncepcja projektu otworu kierunkowego w miocenskich utworach zapadliska przedkarpackiego*. Wiadomości Naftowe i Gazownicze 2009, 3 (131), s. 4–13.
- [11] Such P., Lesniak G., Słota M.: *Ilosciowa charakterystyka porowatosci i przepuszczalnosci utworow czerwonego spagowca potencjalnie zawierajacych gaz ziemny zamkniety*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 4, s. 345–351.
- [12] Zalewska J., Dohnalik M.: *Comparison of rock pore space based on X-ray computed microtomography (micro-CT) and nuclear magnetic resonance (NMR) data. Part III*. Nafta-Gaz 2011, nr 10, s. 702–713.
- [13] Zalewska J., Kaczmarczyk J.: *Analysis of rock samples' internal pore structure based on X-ray computed microtomography data. Part I*. Nafta-Gaz 2011, nr 8, s. 533–544.



Mgr Łukasz KACZMAREK
Doktorant na Wydziale Geologii
Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa
E-mail: lukasz.kaczmarek@uw.edu.pl

Technolog na Wydziale Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej
ul. Wołoska 141
02-507 Warszawa
E-mail: Lukasz.Kaczmarek@inmat.pw.edu.pl



Dr inż. Grzegorz MACHOWSKI
Asystent na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: machog@agh.edu.pl



Mgr Michał MAKSIMCZUK
Technolog na Wydziale Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej
ul. Wołoska 141
02-507 Warszawa
E-mail: michal.maksimczuk@inmat.pw.edu.pl



Dr inż. Tomasz WEJRZANOWSKI
Adiunkt na Wydziale Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej
ul. Wołoska 141
02-507 Warszawa
E-mail: twejrzanowski@inmat.pw.edu.pl