WYNIKI BADAŃ PETROFIZYCZNYCH PRÓBEK RDZENI

Przedstawione w niniejszym rozdziale informacje pochodzą z materiałów zamieszczonych w dokumentacjach Habryn (2012) oraz Wójcicki (2013), skąd wybrano rezultaty badań najistotniejsze z punktu widzenia niniejszego opracowania. Scharakteryzowano badania parametrów zbiornikowych (gęstość, porowatość, przepuszczalność) oraz termicznych (przewodność i pojemność cieplna oraz ciepło radiogeniczne). Próbki, dla których wykonano omawiane poniżej analizy laboratoryjne, zestawiono w tabeli 2.

Adam WÓJCICKI

PARAMETRY ZBIORNIKOWE PRÓBEK RDZENI

Badania porowatości, przepuszczalności i gęstości 19 próbek rdzeni z otworu Czerwony Potok PIG 1 (tab. 3) wykonano w Instytucie Nafty i Gazu na zlecenie PIG-PIB w ramach przedsięwzięcia „Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (*Hot Dry Rocks*) w Polsce" (Habryn, 2012; Wójcicki, 2013).

Pomiary **gęstości** wykonano przy pomocy piknometru helowego (gęstość szkieletowa i gęstość materiałowa) oraz porozymetru rtęciowego (gęstość pozorna, objętościowa). Posłużyły one do określenia **porowatości całkowitej** (oraz nieujętej w tabeli 3 porowatości otwartej). Jednocześnie wykonano badania i parametryzację przestrzeni porowej na podstawie pomierzonych krzywych ciśnień kapilarnych, wykorzystując zależność wielkości ciśnienia kapilarnego od m.in. wielkości promienia i kształtu porów. Pomiary wykonano porozymetrem rtęciowym AutoPore9220, otrzymując w rezultacie **porowatość zliczoną z porozymetru** oraz inne parametry charakteryzujące rozkład przestrzeni porowych i wpływające na przepływ płynów w ich obrębie. **Porowatość zliczona z porozymetru** jest porowatością dynamiczną, tzn. odpowiadającą udziałowi porów, w które wniknęło medium, czyli rtęć, w objętości skały. Jest ona mniejsza od porowatości otwartej o udział wody nieredukowalnej w mikroporach i związanej na powierzchni ścianek porów. Natomiast porowatość całkowita jest większą od tej ostatniej, o udział porów nieskomunikowanych. Oznaczanie współczynnika **przepuszczalności efektywnej** wykonano przy użyciu azotu. Pomiar polegał na doprowadzeniu do ustalonego, laminarnego przepływu gazu przez badaną próbkę i wyliczeniu współczynnika przepuszczalności przy pomocy równania Darcy'ego.

Porowatość całkowita w badanych próbkach waha się w granicach od 0,36 do 3,94%. Są to wielkości charakteryzujące skały bardzo słabo porowate. Współczynnik przepuszczalności wahał się w szerokim zakresie od 0,001 do 2,934 mD, zatem należą one generalnie do skał nieprzepuszczalnych (próbki z dolnej i środkowej części profilu otworu) lub słabo/średnio przepuszczalnych (próbki pobrane w przedziale głębokości 30,3–73,3 m p.p.t.). Wartości średnicy progowej w badanych próbkach wynoszą od 0,5 do 20 μm, przeważnie ok. 1 μm. Dowodzi to słabych właściwości filtracyjnych ośrodka. Usytuowanie względem siebie krzywych uzyskanych dla malejących i rosnących ciśnień świadczy o wielkości odstępstwa realnej przestrzeni porowej od modelu walcowego. Liczbową wartością oddalenia krzywych od siebie jest wartość efektu histerezy. W przypadku badanych próbek wielkość ta wahała się w granicach 37–76%, najczęściej ok. 50%. Wskazuje to na względnie jednorodne wykształcenie przestrzeni porowej badanych skał. Analizowane próbki wykazują mikroporowy charakter przestrzeni porowej. Świadczy o tym wielkość średniej kapilary (0,00–0,46 μm). Procent porów o średnicach większych od 1 μm jest z reguły niski i średnio wynosi ok. 46%, chociaż w niektórych próbkach przekracza 60%.

Tabela 3

Wyniki analiz laboratoryjnych gęstości, porowatości i przepuszczalności skał

Results of density, porosity and permeability laboratory analyzes of rocks

Numer próbki Sample number	Numer labolatoryjny próbki Laboratory sample number	Gęstość materiałowa [g/cm^3] Material density	Porowatość całkowita [%] Total porosity	Gęstość szkieletowa [g/cm^3] Skeletal density	Gęstość z porozymetrem [g/cm^3] Porosimeter density	Porowatość z porozymetrem [%] Porosimeter porosity	Średnia kapilara [µm] Mean capillary	Powierzchnia właściwa [m^2/g] Specific area	Pory >1 µm [%] Pores >1 µm	Średnica progowa [µm] Treshold diameter	Histereza [%] Hysteresis	Współczynnik przepuszczalności [mD] Permeability coefficient
CZP1_4	2719	2,64	3,94	2,64	2,54	3,94	0,37	0,17	63	bm	53	2,934
CZP1_5	2720	2,61	2,85	2,55	2,48	2,69	0,46	0,09	62	20,0	62	2,510
CZP1_7	2721	2,66	2,67	2,62	2,55	2,57	0,26	0,16	34	bm	52	2,067
CZP1_8	2722	2,66	2,85	2,62	2,55	2,74	0,23	0,18	60	bm	53	1,772
CZP1_9	2723	2,63	2,13	2,59	2,54	2,05	0,24	0,14	55	8,0	58	0,731
CZP1_10	2724	2,62	1,07	2,55	2,52	1,00	0,39	0,04	65	0,5	59	0,001
CZP1_11	2725	2,61	0,98	2,61	2,58	0,98	0,41	0,04	51	2,0	60	0,205
CZP1_12	2726	2,62	0,86	2,56	2,54	0,81	0,11	0,12	46	0,5	58	<0,120
CZP1_14	2727	2,63	2,39	2,58	2,52	2,28	0,06	0,63	16	0,7	66	0,001
CZP1_15	2728	2,53	1,20	2,59	2,55	1,28	0,11	0,18	44	1,0	60	0,001
CZP1_16	2729	2,62	0,65	2,59	2,57	0,63	0,15	0,06	65	0,05	40	0,001
CZP1_17	2730	2,60	1,98	2,60	2,55	1,98	0,04	0,79	20	1,0	76	<0,110
CZP1_18	2731	2,63	0,36	2,63	2,62	0,36	0,00	0,00	–	–	–	0,001
CZP1_19	2732	2,62	0,82	2,59	2,57	0,80	0,41	0,03	66	1,0	37	0,001
CZP1_20	2733	2,62	0,62	2,60	2,59	0,61	0,21	0,05	46	0,6	54	0,001
CZP1_21	2734	2,62	0,83	2,62	2,60	0,83	0,05	0,23	31	1,0	71	0,001
CZP1_22	2735	2,66	1,06	2,69	2,66	1,09	0,06	0,29	29	0,5	73	0,110
CZP1_23	2736	2,61	1,56	2,58	2,54	1,51	0,04	0,61	28	4,0	66	0,001
CZP1_24	2737	2,63	0,47	2,60	2,58	0,46	0,00	0,00	–	–	–	0,001

bm – pomiar nieudany

Magdalena PAŃCZYK-NAWROCKA, Marta WRÓBLEWSKA

PARAMETRY TERMICZNE PRÓBEK RDZENI

W laboratorium geofizycznym PIG-PIB wykonano pomiary parametru przewodności cieplnej na 24 próbkach rdzeni z otworu Czerwony Potok PIG 1, natomiast w laboratorium E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University wykonano na zlecenie PIB-PIB pomiary parametru pojemności cieplnej na 6 próbkach rdzeni z tegoż otworu (tab. 2, 4, 5). Ponadto dla 10 próbek określono wartości produkcji ciepła radiogenicznego (tab. 6). Wyniki pomiarów temperatury w otworze zostały omówione w rozdziale dotyczącym badań geofizyki wiertniczej.

Tabela 4

Wyniki pomiaru przewodności cieplnej (K) metodą skanu optycznego. Próbki w stanie suchym

Results of thermal conductivity measurements (K) using optical scanner. Dry samples

Numer próbki Sample number	Głębokość [m] Depth	$K_{śr}$ [W/mK] K_{mean}	K_{min} [W/mK] K_{min}	K_{max} [W/mK] K_{max}
CZP1_01	9,0–9,2	1,6055	1,2145	2,0310
CZP1_02	15,2–15,4	2,1295	1,6870	2,5890
CZP1_03	23,65–23,90	2,0545	1,7870	2,5275
CZP1_04	30,2–30,4	1,9145	1,6280	2,2755
CZP1_05	35,7–35,9	1,8610	1,4480	2,2260
CZP1_06	41,1–41,2	2,3425	1,9225	2,8615
CZP1_07	51,4–51,6	2,5455	2,0115	3,1445
CZP1_08	57,6–57,8	2,1705	1,9030	2,5335
CZP1_09	64,3–64,5	2,3030	1,7580	2,8520
CZP1_10	71,5–71,7	2,9310	2,7350	3,2285
CZP1_11	74,3–74,5	3,0465	2,7290	3,6835
CZP1_12	81,6–81,7	3,0810	2,7870	3,4770
CZP1_13	91,45–91,60	1,9525	1,6220	2,4665
CZP1_14	111,00–111,15	3,2100	2,8030	3,6250
CZP1_15	120,1–120,3	3,0355	2,5505	3,6395
CZP1_16	134,4–134,6	2,9245	2,4980	3,5545
CZP1_17	139,7–139,9	2,7895	2,2575	3,3135
CZP1_18	153,8–154,0	2,6530	2,4625	2,9085
CZP1_19	169,70–169,85	2,9810	2,7480	3,4130
CZP1_20	186,6–186,8	3,2090	2,6525	3,6015
CZP1_21	187,7–187,9	3,0540	2,8495	3,2970
CZP1_22	190,5–190,7	3,1370	2,4200	3,6705
CZP1_23	192,9–193,1	3,4125	2,7780	4,4350
CZP1_24	200,70–200,85	3,0450	2,5755	3,5920

Tabela 5

Pojemność cieplna skał (Cp) obliczona dla temperatur 80–160ºC

Heat capacity of rocks (Cp) measured for temperature range 80–160ºC

Numer próbki Sample number	Cp(80)	Cp(100)	Cp(120)	Cp(120)	Cp(160)
	$[Jg^{-1}K^{-1}]$				
CZP1_12	0,842280	0,871558	0,89848	0,923549	0,944728
CZP1_15	0,841809	0,869969	0,895411	0,918505	0,940475
CZP1_18	0,842269	0,870043	0,895201	0,918560	0,939575
CZP1_20	0,841585	0,870044	0,895053	0,918039	0,939627
CZP1_22	0,850114	0,879165	0,906012	0,931088	0,953350
CZP1_24	0,846346	0,874258	0,899347	0,922803	0,945039

Tabela 6

Produkcja ciepła radiogenicznego obliczona na podstawie pomierzonych zawartości pierwiastków promieniotwórczych w skałach

Production of radiogenic heat calculated basing on measured content of radioactive elements in rocks

Numer próbki Sample number	Produkcja ciepła radiogenicznego [μW/m^3] Production of radiogenic heat
CZP1_03	3,913
CZP1_05	3,618
CZP1_07	4,071
CZP1_10	8,782
CZP1_12	7,554
CZP1_15	3,950
CZP1_18	7,051
CZP1_20	3,320
CZP1_22	3,358
CZP1_24	6,875

Magdalena PAŃCZYK-NAWROCKA, Marta WRÓBLEWSKA

BADANIA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ

Parametr przewodności cieplnej charakteryzuje intensywność wymiany ciepła na drodze przewodzenia w danym ośrodku skalnym, a jego wielkość zależy od składu mineralnego, uziarnienia, porowatości, wielkości i kształtu porów, zawartości płynów złożowych w skale i jej zawilgocenia (Wójcicki i in., 2013).

Przewodność cieplna próbek została pomierzona za pomocą skanera optycznego TCS (Popov i in., 1999) (tab. 4). Idea pomiaru jest oparta na porównaniu nadmiaru rejestrowanego ciepła z próbki i wzorca. Próbka oraz wzorzec ogrzewane są przez ruchome, zogniskowane źródło ciepła, a pomiar odbywa się za pomocą czujników temperatury w podczerwieni. Pomiar zrealizowano w warunkach temperatury pokojowej na 24 próbkach suchych, przy czym dla każdej z próbek pomiar wykonano dwukrotnie, w kierunku równoległym i prostopadłym do osi rdzenia.

Wyniki pomiaru przewodności cieplnej przedstawione w tabeli 4 wskazują, że średnia wartość tego parametru w otworze wynosi 2,64 W/m*K. Dla porównania zmierzone przez Plewę (1994) próbki granitu ze Szklarskiej Poręby charakteryzowały się przewodnościami: 2,55 W/m*°C (granit drobno- i średnioziarnisty) i 1,64 W/m*°C (granit średnioziarnisty). Badania wykazały, że granity drobno- i średnioziarniste mogą cechować się wyższymi wartościami tego parametru w stosunku do granitów gruboziarnistych. Przewodność cieplna rośnie stopniowo wraz z głębokością, uzyskując maksymalną wartość 4,435 W/m*K. Wyraźne odstępstwo wykazuje próbka nr CZP1_13 (tab. 4) opisana jako kataklazyt, pobrana z głębokości 91,45–91,60 m, której przewodność cieplna wynosi 1,9525 W/m*K. Próbka ta charakteryzowała się podwyższoną porowatością, która przyczyniła się do spadku przewodności cieplnej. Graficznie wyniki pomiarów przedstawiono na figurze 8, gdzie wyraźnie wyróżnia się odrębność przewodności cieplnej kataklazytu.

Magdalena PAŃCZYK-NAWROCKA, Marta WRÓBLEWSKA

BADANIA POJEMNOŚCI CIEPLNEJ

Pojemność cieplna próbek skał została pomierzona za pomocą kalorymetru różnicowego DSC C-80 wykonującego pomiary w zakresie temperatur 20–300°C. Uzyskane wyniki zostały przeliczone w odniesieniu do temperatury (Kelley, 1960) dla przedziału 80–160°C, zgodnie z przyjętym założeniem projektu „Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (*Hot Dry Rocks*) w Polsce", w ramach którego wykonano otwór Czerwony Potok PIG 1 (Wójcicki, 2013; Wójcicki i in., 2013). Uzyskane wyniki przypisane do typu litologicznego granitoidu wskazują, że pojemność cieplna tego typu skał zmienia się od 0,842 J/(g*K) dla temperatury 80°C do 0,953 J/(g*K) przy 160°C. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.

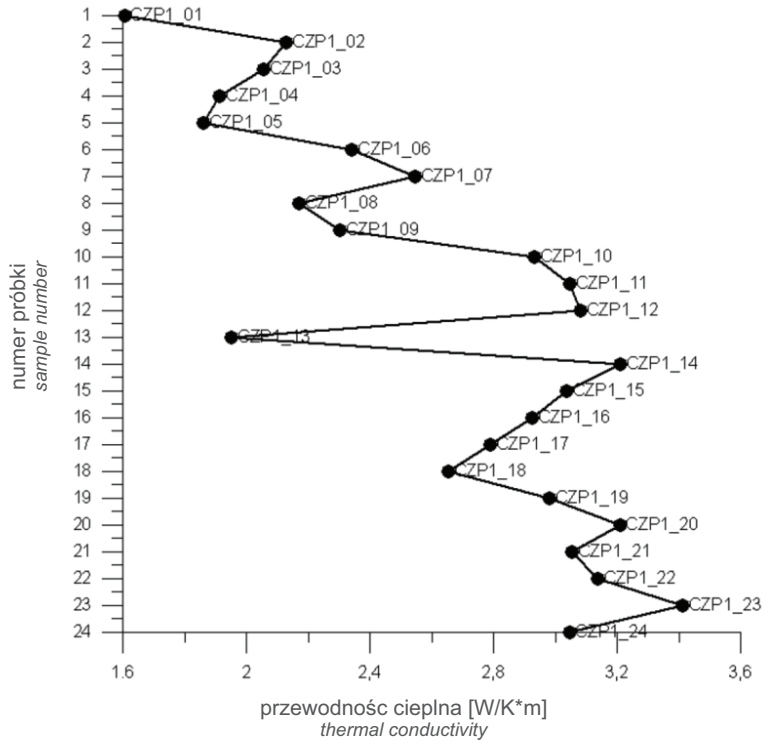


Fig. 8. Średnia przewodność cieplna badanych próbek pobranych z rdzenia wiertniczego otworu Czerwony Potok PIG 1

Average thermal conductivity of drill core samples of the Czerwony Potok PIG 1 borehole

Magdalena PAŃCZYK-NAWROCKA, Marta WRÓBLEWSKA

CIEPŁO RADIOGENICZNE

Ciepło dochodzące z wnętrza do powierzchni Ziemi stanowi sumę ciepła przewodzonego w drodze kondukcji, konwekcji oraz promieniowania. Według danych literaturowych (Plewa, 1988, 1994) udział ciepła radiogenicznego w powierzchniowym strumieniu cieplnym jest szacowane do 50%. Zmiany pola ciepła radiogenicznego przebiegają bardzo powoli, iż można uznać je za stacjonarne. Znając zawartość pierwiastków radiogenicznych w skale (informacje na ten temat przedstawiono w następnym rozdziale) oraz gęstość objętościową skały można obliczyć produkcję ciepła radiogenicznego A, wykorzystując wzór Rybacha (1973):

$$A=10^{-2}*\rho*(9{,}25*C_U+2{,}56*C_T+3{,}48*C_K)$$

gdzie:
ρ – gęstość objętościowa [g/cm^3],
C_U – zawartość izotopów U-238 oraz U-235 [ppm],
C_T – zawartość izotopów Th-232 [ppm],
C_K – zawartość potasu [%].

W ten sposób, na podstawie zawartości pierwiastków promieniotwórczych i wartości gęstości objętościowej pomierzonej dla 10 próbek skał z otworu Czerwony Potok PIG 1, wykonano obliczenia ciepła radiogenicznego dla tych próbek, zaprezentowane w tabeli 6 i na figurze 9. Cztery próbki (nr CZP1_10, CZP1_12, CZP1_18, CZP1_24) osiągnęły bardzo wysokie wartości powyżej 6 μW/m^3, co jest skorelowane z wysokimi zawartościami uranu i toru w tych próbkach (fig. 9).

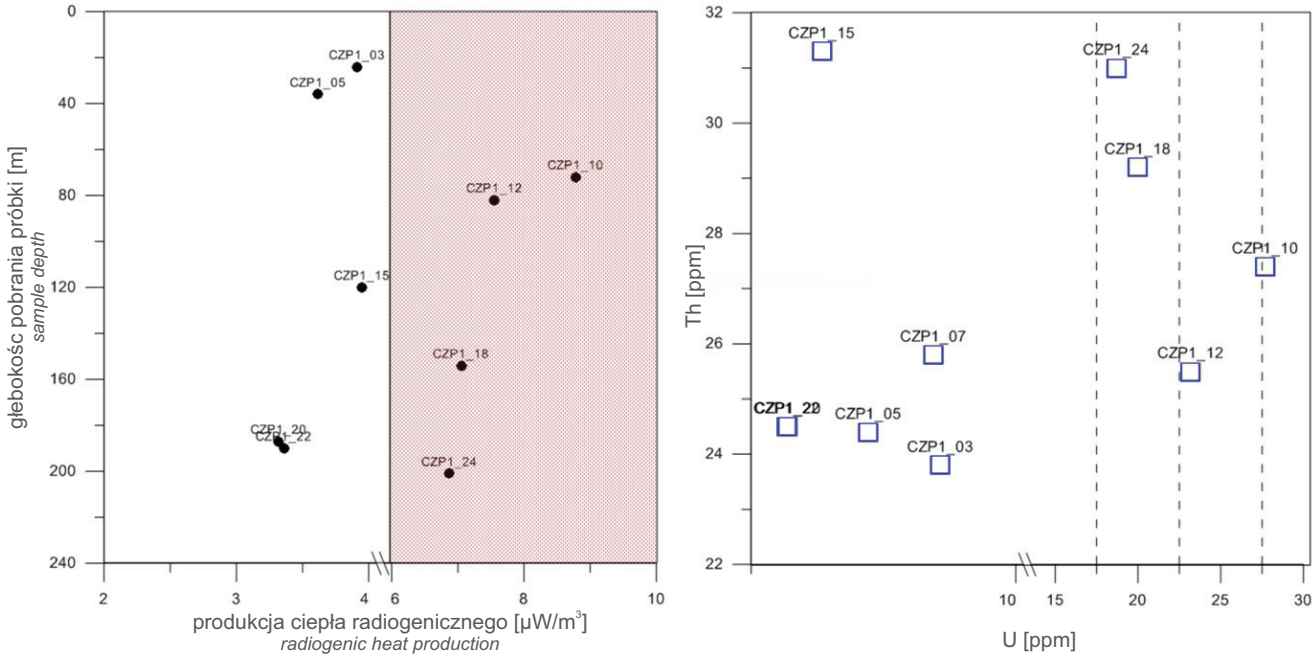


Fig. 9. Wyniki produkcji ciepła radiogenicznego w zestawieniu z wykresem zawartości toru i uranu w skałach

The results of the radiogenic heat production versus the chart of the content of thorium and uranium in rocks