

Anna SOWIŹDŹAŁ
Michał KACZMARCZYK
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Katedra Surowców Energetycznych
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. (+48 12) 617 38 43, (+48 12) 617 50 57
ansow@agh.edu.pl, michal.kaczmarczyk@interia.eu

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2013

CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW TERMICZNYCH SKAŁ OSADOWYCH BUDUJĄCYCH ZBIORNIKI PETROGEOTERMALNE W CENTRALNEJ CZĘŚCI NIŻU POLSKIEGO

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia wyniki badań termicznych, takich jak pomiar współczynnika przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego, wykonanych na próbkach skał osadowych (piaskowce, wapień, mułowce) pobranych z głębokich otworów wiertniczych zlokalizowanych w centralnej części Niżu Polskiego. Obszar ten, obejmujący swoim zasięgiem rejon niecki mogileńsko-lódzkiej oraz niewielki fragment wału kujawskiego i monokliny przedsudeckiej, został wytypowany jako potencjalna lokalizacja badawcza dla lokalizacji systemów EGS w skałach osadowych. Potencjalnymi zbiornikami energii petrogeotermalnej są głęboko zalegające utwory triasu dolnego i środkowego, dolnego permu lub karbonu. Z utworów tych pobrano próbki skalne i wykonano na nich badania parametrów termicznych. Współczynnik przewodności cieplnej wyznaczony został dla 24 próbek pobranych z sześciu otworów wiertniczych. Wszystkie wartości pomierzone zostały dla próbek suchych, w dwóch kierunkach: prostopadłym i równoległym. Ciepło właściwe wyznaczono dla 20 próbek pobranych z jedenastu otworów wiertniczych. Najwyższe parametry termiczne uzyskano dla skał piaszczystych.

SŁOWA KLUCZOWE

EGS, skały osadowe, przewodność cieplna, ciepło właściwe

* * *

WPROWADZENIE

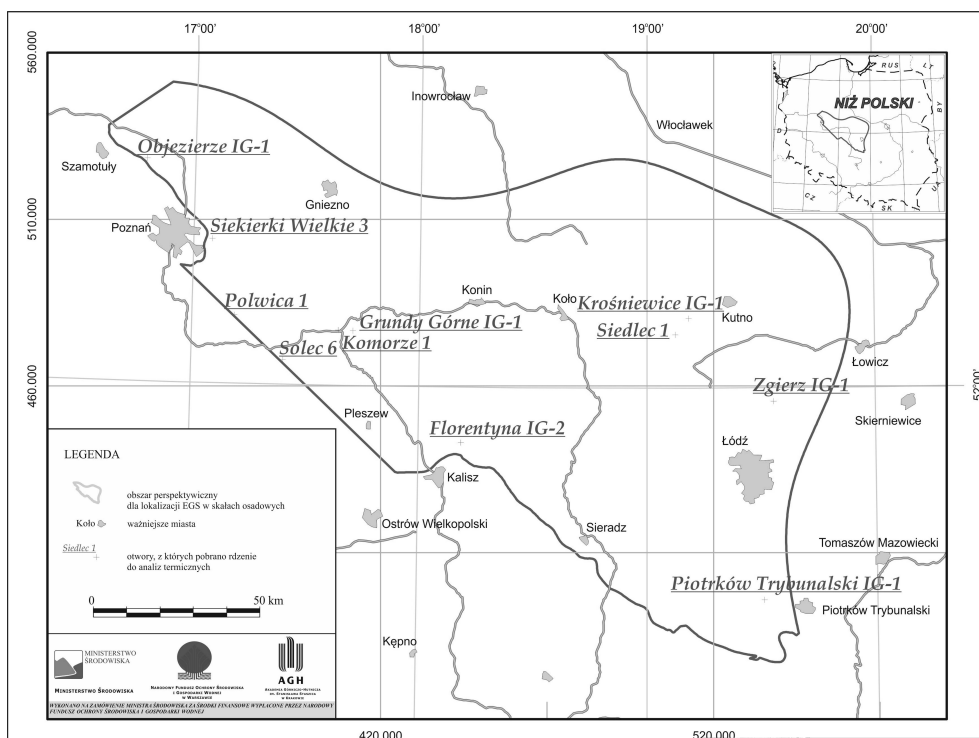
W skałach budujących zbiorniki petrogeotermalne nośnikiem energii (ciepła) są media (najczęściej woda) wprowadzane otworami wiertniczymi do nagranych formacji skalnych. Są to tzw. suche gorące skały (HDR – *Hot Dry Rocks*). W większości projektów HDR na

świecie skałami zbiornikowymi są granity, rzadziej spotykane są systemy wykorzystujące energię gorących suchych skał osadowych. Ze względu na występowanie w skałach osadowych pewnych ilości wody mówimy o wykorzystaniu ich energii w niekonwencjonalnych systemach geotermicznych nazwanych EGS (*Enhanced Geothermal System*), które mają na celu pozyskanie ekonomicznie opłacalnych ilości ciepła zakumulowanego w skałach o niskiej przepuszczalności i/lub porowatości na obszarach występowania anomalii termicznych (Tester i in. 2006). Analiza parametrów petrofizycznych (w tym termicznych) ośrodka skalnego ma podstawowe znaczenie podczas poszukiwania struktur dla lokalizacji EGS. Zarówno analiza przewodności cieplnej jak i ciepła właściwego determinują możliwość efektywnego odbioru ciepła od gorących formacji skalnych i skutecznego przekazania go na powierzchnię terenu. Skały zbiornikowe powinny charakteryzować się jak najniższą porowatością i przepuszczalnością oraz jak najwyższą przewodnością cieplną.

W latach 2010–2013 realizowany był projekt *Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (Hot Dry Rocks) w Polsce*, którego celem była ocena możliwości wykorzystania struktur geologicznych do budowy zamkniętych systemów geotermicznych (EGS lub HDR) na obszarze Polski poprzez zobrazowanie kartograficzne wybranych struktur perspektywicznych dla tego typu systemów. Projekt zakładał przeprowadzenie badań dla różnych typów skał (i tym samym odmiennych warunków geologicznych) – osadowych, wulkanicznych i krystalicznych. Do zadań zespołu AGH należały prace związane z analizą możliwości wykorzystania skał osadowych na obszarze Polski jako zbiorników energii petrogeotermalnej. Przeprowadzone prace analityczne pozwoliły na wytypowanie kilku potencjalnych obszarów perspektywicznych dla budowy zamkniętych systemów geotermicznych w skałach osadowych, przy czym największe perspektywy wskazano w centralnej części Niżu Polskiego. Na obszarze obejmującym swoim zasięgiem rejon niecki mogileńsko-łódzkiej oraz niewielki fragment wału kujawskiego i monokliny przedsudeckiej wskazano perspektywy do budowy zamkniętych systemów geotermicznych w skałach triasu środkowego i dolnego, permu dolnego oraz karbonu.

W celu rozpoznania parametrów zbiornikowych skał budujących potencjalne zbiorniki energii petrogeotermalnej pobrano ponad 300 prób skał osadowych z 11 profili wierceń znajdujących się w wytypowanym obszarze badawczym (rys. 1). Dla prób, których rozmiary umożliwiały przeprowadzenie pomiarów parametrów termicznych wykonano badanie współczynnika przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego.

Współczynnik przewodności cieplnej wyznaczony został dla 24 próbek z sześciu otworów wiertniczych: Zgierz IG-1, Piotrków Trybunalski IG-1, Siedlec 1, Grundy Górne IG-1, Florentyna IG-2 oraz Siekierki Wielkie 3, natomiast ciepło właściwe wyznaczono dla 20 próbek z jedenastu otworów wiertniczych: Siedlec 1, Piotrków Trybunalski IG-1, Krośniewice IG-1, Grundy Górne IG-1, Zgierz IG-1, Florentyna IG-1, Siekierki Wielkie 3, Solec 6, Polwica-1, Objezierze IG-1, Komorze 1.



Rys. 1. Lokalizacja otworów, z których pobrano rdzenie do analiz

Fig. 1. Localization of wells with cores

Badanie przewodności cieplnej

Przewodność cieplna jest jednym z podstawowych parametrów termicznych skał, charakteryzujących intensywność wymiany ciepła na drodze przewodzenia w danym ośrodku skalnym. Jest to ilość ciepła, przechodzącego przez ośrodek skalny na drodze jednego metra w czasie jednej sekundy, w kierunku prostopadłym do danego przekroju o powierzchni 1 m^2 , przy gradiencie temperatury $1^\circ/\text{m}$ (Plewa 1994):

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{s \cdot (T_0 - T_1) \cdot t} \quad [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$$

gdzie:

- λ – współczynnik przewodności cieplnej,
- Q – ilość ciepła [J],
- l – droga przewodzenia ciepła między dwoma równoległymi płaszczyznami, charakteryzującymi się stałościami temperatury T_0 i T_1 , ($T_0 > T_1$) [m],
- t – czas [s],
- s – powierzchnia [m^2].

Przewodność cieplna ośrodka skalnego zależy od: składu mineralnego, uziarnienia, porowatości, wielkości i kształtu porów, stosunków objętościowych fazy stałej, ciekłej i gazowej oraz wilgotności badanej struktury. Decydujący wpływ na wartość współczynnika przewodności cieplnej ma jednak szkielet skalny (Plewa 1994). Z punktu widzenia poszukiwania osadowych skał zbiornikowych dla systemów EGS istotne jest występowanie skał o jak najniższej porowatości i jak najwyższej przewodności cieplnej skały. W trakcie przepływu energii cieplnej wymiana ciepła zachodzi głównie na drodze przewodzenia ciepła w szkielecie skalnym i konwekcji (makroskopowy ruch materii w gazie, cieczy itp.) w pustych porach i szczelinach skalnych. Ponieważ współczynnik przewodzenia gazów jest bardzo mały (dla powietrza wynosi ok. 0,023 W/(m · K)), można stwierdzić, że współczynnik λ w skałach porowatych suchych jest znacznie mniejszy niż w skałach zwięzłych o bardzo małej porowatości (Mikoś, Stewarski 1977).

Pomiary współczynnika przewodności cieplnej skał wykonane zostały dla 24 próbek pobranych z utworów triasu, permu lub karbonu z sześciu otworów wiertniczych (tab. 1). Wszystkie wartości pomierzone zostały dla próbek suchych. Przebadano skały węglanowe ($T2$, $T1$), terygeniczne ($T1$, P , C) oraz mułowce ($T3$, $T2$, C). Badanie zostało wykonane za pomocą urządzenia TCS – *Thermal Conductivity Scanner*. Służy ono do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej w zakresie 0,2–25 W/(m · K). Błąd pomiarowy urządzenia szacowany jest maksymalnie na 3%. Przed badaniem próbki zostały przecięte, wyszlifowane i pomalowane specjalną farbą (rys. 2). Współczynnik przewodności cieplnej skał zbadano w dwóch kierunkach: prostopadłym i równoległym (jeżeli tylko pozwolił na to rozmiar próbki). Dla każdej próby badanie wykonywano kilkakrotnie zmieniając standard pomiaru i analizując uzyskane wyniki pod kątem ich poprawności.

Większość analizowanych próbek skalnych cechuje się niską wartością porowatości efektywnej (tab. 1); wyjątkiem jest wapień mikrosparytowy pobrany z otworu Grundy Górne IG-1, dla którego wartość porowatości efektywnej wynosi 25%. Porowatością efektywną na poziomie powyżej 5% charakteryzują się ponadto: wapień mikrosparytowy (7,83%) oraz waka arkozowa drobnoziarnista (8,51%) pobrane z otworu Piotrków Trybunalski IG-1.

Badanie współczynnika przewodności cieplnej w kierunku równoległym wykonano dla 23 prób. Największą jego średnią wartość (4,444 W/(m · K)) uzyskano dla arenitu kwarcowego drobnoziarnistego pobranego z otworu Zgierz IG-1 (głębokość pobrania próby 4196,5 m), a najmniejszą 2,201 W/(m · K) dla wapienia mikrosparytowego pobranego z otworu Grundy Górne IG-1 (głębokość pobrania próby 2201,0 m).

Badanie współczynnika przewodności cieplnej w kierunku prostopadłym wykonano dla 21 prób. Podobnie jak w kierunku równoległym największą jego średnią wartość w kierunku prostopadłym (4,238 W/(m · K)) uzyskano dla arenitu kwarcowego drobnoziarnistego pobranego z otworu Zgierz IG-1 (głębokość pobrania próby 4196,5 m). Najmniejszą wartością badanego parametru (1,531 W/(m · K)) charakteryzował się wapień mikrosparytowy pobrany z otworu Florentyna IG-2 (głębokość pobrania próby 2413,0 m).

Analizując wyniki uśrednione dla poszczególnych otworów wiertniczych stwierdzono, że najwyższymi wartościami współczynnika przewodności cieplnej – zarówno w kierunku

Tabela 1

Współczynnik przewodności cieplnej analizowanych próbek skał

Table 1

Thermal conductivity of the analyzed rock samples

Lp	Nazwa otworu	Litologia	Stratygrafia	Średnia wartość współczynnika przewodności cieplnej (W/(m·K))		Współczynnik porowatości	Anizotropia	
				kierunek równoległy	kierunek prostopadły			
1	Zgierz IG-1	Wapień mikrospartytowy	T2	2,234	2,179	0,0109	1,0125	
2		Arenit kwarcowy drobnoziarnisty	T1	4,444	4,238	0,0387	1,0240	
3	Piotrków Trybunalski IG-1	Wapień spartytowy	T2	2,171	2,162	0,0350	1,0021	
4		Wapień mikrospartytowy		2,332	1,566	0,0067	1,2203	
5		Wapień mikrytowo-mikrospartytowy		2,415	2,429	0,0092	0,9971	
6		Wapień mikrytowo-mikrospartytowy		2,554	1,958	0,0154	1,1421	
7		Wapień biomikrytowo-spartytowy		brak pomiaru	1,938	0,0262	brak pomiaru	
8		Wapień mikrospartytowy	T1	2,525	2,371	0,0783	1,0320	
9		Wapień mikrospartytowy		3,704	3,842	0,0099	0,9819	
10		Wapień mikrospartytowy		3,211	3,306	0,0099	0,9855	
11		Wapień mikrospartytowy		3,080	3,982	0,0165	0,8795	
12		Arenit arkozowy bardzo drobnoziarnisty		2,817	2,445	0,0475	1,0734	
13		Subarkoza drobnoziarnista		2,273	1,730	0,0285	1,1462	
14		Arenit arkozowy bardzo drobnoziarnisty		2,417	2,366	0,0158	1,0107	
15		Subarkoza bardzo drobnoziarnista		2,526	2,615	0,0337	0,9828	
16		Waka arkozowa drobnoziarnista		2,599	2,620	0,0851	0,9960	
17		Siedlec 1	Mułowiec krzemionkowo-ilasty	T3	2,474	brak pomiaru	0,0110	brak pomiaru
18			Mułowiec krzemionkowy	T2	2,298	brak pomiaru	0,0149	brak pomiaru
19	Wapień mikrytowy			2,642	2,628	0,0089	1,0027	
20	Grundy Górne IG-1	Wapień mikrospartytowy	T2	2,086	2,077	0,2506	1,0022	
21		Subarkoza drobnoziarnista	P	3,203	brak pomiaru	0,0480	brak pomiaru	
22	Florentyna IG-1	Wapień mikrospartytowy	T2	2,473	1,531	0,0075	1,2709	
23	Siekierki Wielkie 3	Subarkoza drobnoziarnista	C	3,148	3,187	0,0259	0,9939	
24		Mułowiec drobnoziarnisty		3,100	3,263	0,0119	0,9747	



Rys. 2. Próbkę przygotowaną do badań termicznych

Fig. 2. A sample prepared for examination of thermal properties

prostopadłym jak równoległym – charakteryzują się skały osadowe pobrane z otworów Zgierz IG-1 oraz Siekierki Wielkie 3. W przypadku prób z tych otworów wysokie średnie wartości są zasługą występowania piaskowców, wspomnianego powyżej arenitu z otworu Zgierz IG-1 oraz subarkozy drobnoziarnistej z otworu Siekierki Wielkie 3 (głębokość pobrania próby 4117,8 m), dla której przewodność w kierunku równoległym wyniosła 3,148 W/(m · K), a prostopadłym 3,187 W/(m · K). Najniższe wartości reprezentuje wapień mikrosparytowy z otworu Florentyna IG-1 (głębokość pobrania 2413,0 m).

Spośród analizowanych typów skał najwyższą średnią wartością współczynnika przewodności cieplnej charakteryzują się mułowce, następnie piaskowce, a na końcu wapień (tab. 2). Współczynnik przewodności cieplnej mułowców cechuje się najmniejszym zróżnicowaniem, podczas gdy największy przedział zmienności zaobserwowano dla piaskowców (rys. 3). Minimalną wartością wynoszącą 1,47 W/(m · K), cechuje się dolnotriasowa subarkozy drobnoziarnista z otworu Piotrków Trybunalski IG-1, a maksymalną (4,85 W/(m · K)) dolnotriasowy arenit kwarcowy drobnoziarnisty pobrany z otworu Zgierz IG-1. Również wapień charakteryzują się dużą zmiennością analizowanego parametru (1,45–4,15 W/(m · K)). Nie obserwuje się występowania liniowej zależności pomiędzy głębokością poboru próbki a przewodnością cieplną skał (rys. 4). Należy dodać, że wartość współczynnika przewodności cieplnej rośnie wraz ze spadkiem współczynnika porowatości skały (rys. 5), co potwierdza tezę, że przewodność cieplna w skałach porowatych suchych jest znacznie mniejsza niż w skałach zwięzłych o bardzo małej porowatości (Mikoś, Stewarski 1977).

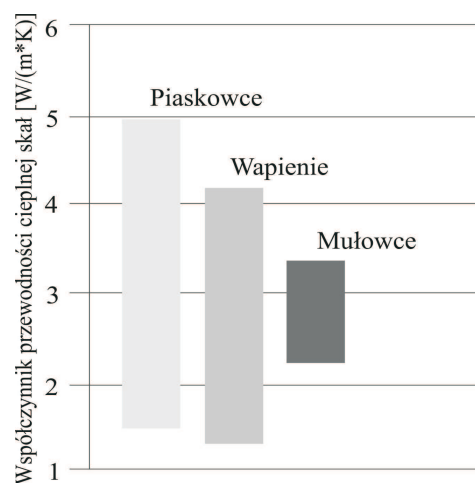
Tabela 2

Średnia wartość współczynnika przewodności cieplnej poszczególnych typów skał

Table 2

Average thermal conductivity of different types of rocks

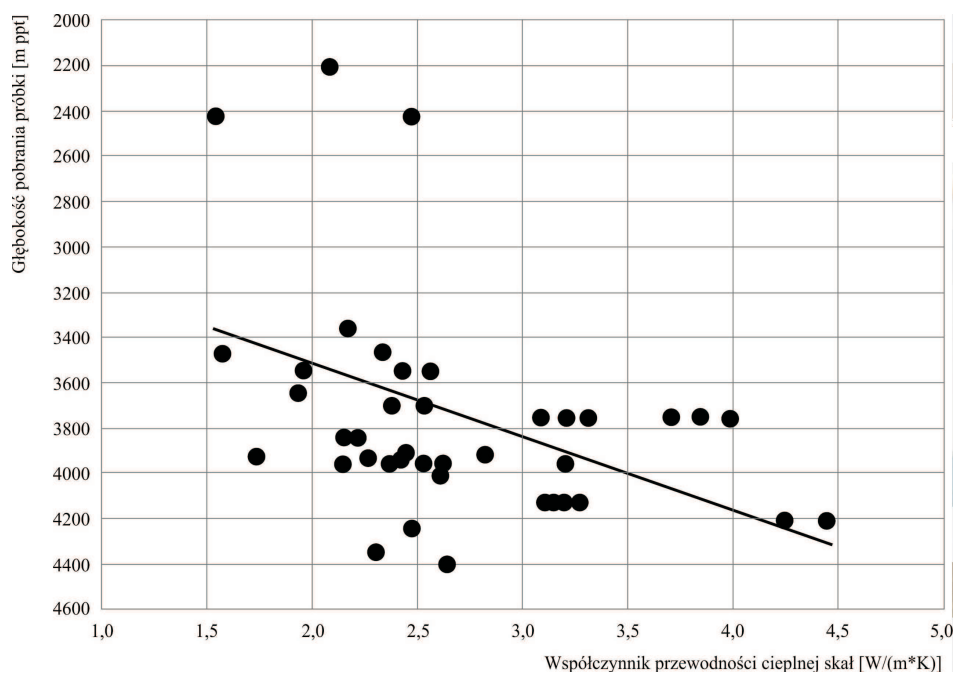
Typ skały	Średnia wartość współczynnika przewodności cieplnej (W/m·K)	
	Kierunek równoległy	Kierunek prostopadły
Wapień	2,6189	2,4592
Piaskowce	2,9284	2,7430
Mułowce	2,6240	3,2630



Rys. 3. Przedziały zmian przewodności cieplnej różnych typów skał (próbki suche)

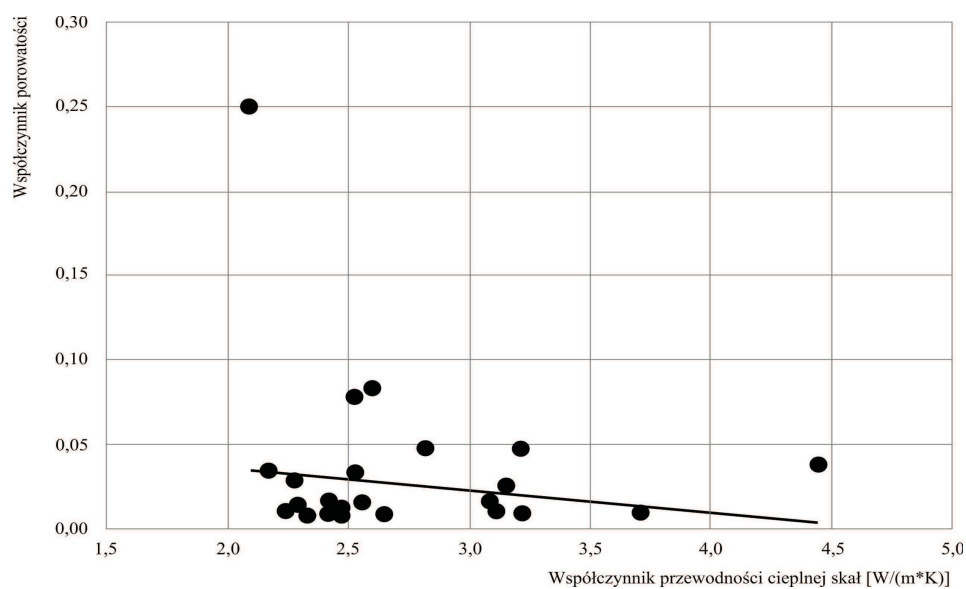
Fig. 3. The ranges of thermal conductivity changes of different rock types (dry samples)

Istotną rolę przy określaniu przewodności cieplnej skał odgrywa anizotropia ośrodka. Przewodność mierzona równoległe do uwarstwienia skały jest zwykle większa od przewodności mierzonej prostopadle do uwarstwienia. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań przedstawione w tabeli 1. Współczynnik anizotropii cieplnej skał, która jest związana z uwarstwieniem poszczególnych formacji skalnych oraz porowatości (w tym wykształcenia i form porów, mikro- i makroszczelinowatości) obliczono według wzoru (Mikoś, Stewarski 1977):



Rys. 4. Zmiana średniej przewodności cieplnej wraz z głębokością poboru próby

Fig. 4. The average thermal conductivity change with the depth samples depth



Rys. 5. Zależność średniej przewodności cieplnej skał od ich porowatości

Fig. 5. The dependence of the thermal conductivity from the rock porosity

$$A_c = \sqrt{\frac{a_r}{a_p}}$$

gdzie:

- A_c – współczynnik anizotropii cieplnej,
- a_r – przewodność mierzona równoległe do uwarstwienia skały,
- a_p – przewodność mierzona prostopadle do uwarstwienia skały.

Badanie ciepła właściwego

Badania parametrów termicznych, których celem było przeanalizowanie zachowania się ośrodka skalnego podczas odbioru od niego ciepła, oparte zostały na metodzie analizy termicznej. Metoda wykorzystywana jest do badania reakcji chemicznych i przemian fizycznych zachodzących w czasie ogrzewania/studzenia próbki. Techniki jednoczesne, o których mowa, obejmują badanie próbki w tym samym czasie dwoma lub większą liczbą technik pomiarowych, w omawianym przypadku jest to TG-DSC (termograwimetria oraz różnicowa kalorymetria skaningowa) (Szumera 2011; Stoch 1996).

W przypadku termograwimetrii zbadana została zmiana masy próbki przy wzroście temperatury, natomiast w przypadku różnicowej kalorymetrii skaningowej badany był swobodny przepływ strumienia ciepła pomiędzy badaną próbką a otoczeniem. Wynikiem pomiaru jest krzywa DSC, która przedstawia ilość ciepła wymienionego przez próbkę z otoczeniem w jednostce czasu w funkcji temperatury. Dla zobrazowania wyników, wartości ciepła właściwego uzyskiwane dla temperatur 100°C i 150°C, których obrazem są krzywe DSC, zostały przeniesione do tabeli (tab. 3) Pod uwagę wzięty został pomiar ciepła właściwego z jednoczesnym wyznaczeniem zależności ciepła właściwego od temperatury (C_p/T). Ciepło właściwe C_p opisuje wzór (Plewa 1994):

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

gdzie:

- Q – ilość ciepła niezbędna do ogrzania masy m skały do zmiany jej temperatury ΔT [J],
- m – masa skały [kg],
- ΔT – przyrost temperatury [K].

Analiza termiczna badanych próbek skalnych została wykonana w Wydziałowym Laboratorium Badań Termofizycznych Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH przy użyciu analizatora termicznego NETZSCH STA 449 F3 Jupiter® firmy NETZSCH. Badaniom termicznym poddano 20 próbek skalnych. Były to głównie wapienie i piaskowce.

Tabela 3

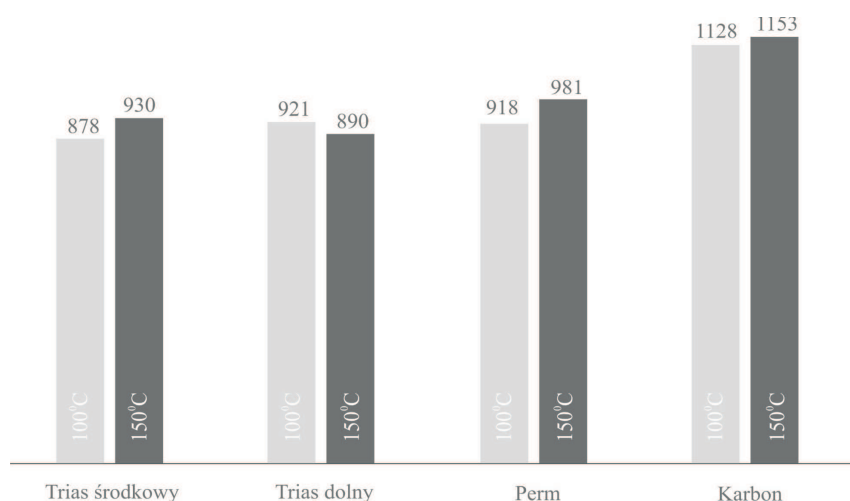
Ciepło właściwe analizowanych próbek skal dla temperatur 100°C i 150°C

Table 3

Specific heat of the analyzed rock samples for the temperature 100°C and 150°C

Lp.	Nazwa otworu	Stratygrafia	Litologia	Ciepło właściwe [J/(kg · K)]	
				100°C	150°C
1	Siedlec 1	T3	Wapień mikrosparytowy	817,91	860,15
2	Piotrków Trybunalski IG-1	T2	Wapień sparytowy	752,22	781,28
3	Krośniewice IG-1		Subarkoza bardzo drobnoziarnista	1 204,40	1 400,81
4	Florentyna IG-1		Wapień mikrosparytowy	1 031,21	962,30
5	Siedlec 1		Wapień mikrosparytowy	765,79	815,86
6	Grundy Górne IG-1		Wapień mikrosparytowy	750,64	784,38
7	Zgierz IG-1		Wapień oosparytowy	821,66	904,32
8	Piotrków Trybunalski IG-1		T1	Waka arkozowa drobnoziarnista	671,27
9	Florentyna IG-1	Subarkoza bardzo drobnoziarnista		763,01	823,60
10	Siedlec 1	Subarkoza drobnoziarnista		1 261,52	885,76
11	Siekierki Wielkie 3	P	Waka arkozowa średnioziarnista	780,67	827,67
12	Solec 6		Arenit arkozowy drobnoziarnisty	868,67	939,66
13	Polwica-1		Arenit sublityczny średnioziarnisty	981,26	1 078,45
14	Objezierze IG-1		Arenit arkozowy drobnoziarnisty	1 134,12	1 227,03
15	Komorze 1		Arenit lityczny drobnoziarnisty	826,78	833,30
16	Siekierki Wielkie 3	C	Subarkoza drobnoziarnista	1 138,94	1 210,82
17	Solec 6		Subarkoza drobnoziarnista	1 141,82	1 179,80
18	Polwica-1		Arenit kwarcowy bardzo drobnoziarnisty	1 347,41	1 308,90
19	Komorze 1		Waka arkozowa drobnoziarnista	881,81	876,63
20	Objezierze IG-1		Mułowiec krzemionkowo ilasty	1 132,01	1 187,45

Analizując średnie wartości ciepła właściwego dla poszczególnych wydziałów stratygraficznych dla temperatur 100°C i 150°C (rys. 6) obserwuje się, że najwyższymi wartościami ciepła właściwego cechują się utwory karbońskie. W przypadku utworów dolnotriasowych zauważalny jest spadek wartości średniej C_p wraz ze wzrostem temperatury. Wpływ na taki niekorzystny wynik ma pomiar wykonany dla próbki subarkozy drobnoziarnistej, dla której C_p w temperaturze 100°C wyniosło 1260 J/(kg · K), podczas gdy w temperaturze 150°C wartość C_p spadła do 880 J/(kg · K). Pozostałe próbki dolnotriasowe cechują się wzrostem C_p wraz z temperaturą. Najniższą uśrednioną wartością analizowanego parametru pomierzoną dla temperatury 100°C charakteryzują się utwory środkowotriasowe, podczas gdy dla temperatury 150°C utwory dolnotriasowe (wpływ próbki z otworu Siedlec 1).

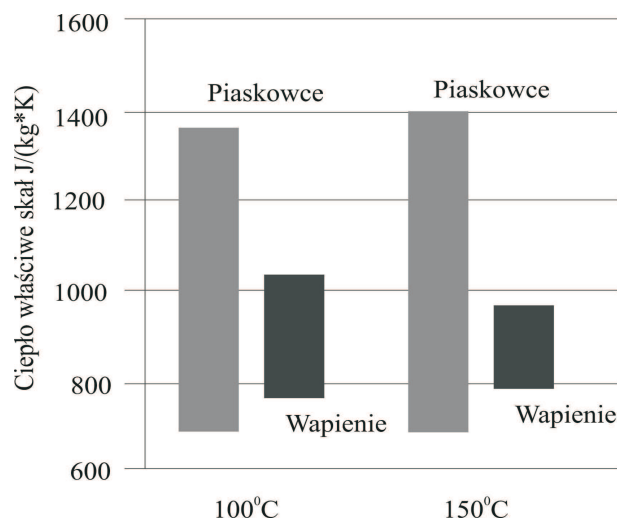


Rys. 6. Uśredniona wartość ciepła właściwego (J/(kg · K)) dla poszczególnych wydziałów stratygraficznych dla temperatur 100°C i 150°C

Fig. 6. The averaged value of the specific heat (J/(kg · K)) for each stratigraphic precipitates at temperatures of 100°C and 150°C

Wśród potencjalnych osadowych skał zbiornikowych dla systemów EGS piaskowce charakteryzują się większym zróżnicowaniem wartości ciepła właściwego od wapieni (tab. 3, rys. 7). Jednocześnie piaskowce częściej charakteryzują się wyższymi wartościami C_p niż wapienie. Maksymalną wartość C_p pomierzono dla piaskowca (T2) pobranego z otworu Krośnice IG-1 z głębokości 4563,2 m (1400 J/(kg · K) przy temperaturze 150°C). Średnia wartość C_p dla piaskowców jest wyższa niż dla wapieni i wynosi odpowiednio dla temperatur 100°C i 150°C:

- Piaskowce – 1000 i 1020 J/(kg · K),
- Wapienie – 820 i 850 J/(kg · K).



Rys. 7. Zakres zmienności ciepła właściwego dla poszczególnych typów skał osadowych dla temperatur 100°C i 150°C

Fig. 7. Range of specific heat change for different types of sedimentary rocks of temperatures of 100°C and 150°C

PODSUMOWANIE

Istotną cechą skał budujących zbiorniki petrogeotermalne jest ich niska porowatość i przepuszczalność oraz wysokie wartości parametrów termicznych. Wyniki przeprowadzonych badań termicznych na próbkach skał osadowych pobranych z utworów wytypowanych jako potencjalnie perspektywiczne dla lokalizacji systemów EGS, wskazują na duże zróżnicowanie zarówno przewodności cieplnej jak i ciepła właściwego analizowanych próbek skalnych. Wśród skał osadowych jako zbiorniki petrogeotermalne rozpatrywane są przede wszystkim piaskowce oraz wapienie o korzystnych parametrach zbiornikowych dla tego typu systemów. Wśród tych typów skał wyższymi wartościami parametrów termicznych charakteryzują się piaskowce, jakkolwiek zauważalna jest duża ich zmienność nawet w profilu tego samego otworu. Zarówno średnia przewodność cieplna jak i ciepło właściwe pomierzone dla próbek skał węglanowych charakteryzują się niższymi średnimi wartościami od wartości pomierzonych dla próbek skał terygenicznych, co nie oznacza, że lokalnie nie mogą one być rozpatrywane jako perspektywiczne zbiorniki energii petrogeotermalnej. Jednoznacznie natomiast zauważalny jest związek pomiędzy parametrami termicznymi skały a jej porowatością – im skała bardziej zwięzła tym lepsze parametry termiczne są rejestrowane.

Przedstawione powyżej wyniki wskazują, że najwyższą wartość współczynnika przewodności cieplnej wykazuje piaskowiec dolnotriasowy pobrany z otworu Zgierz IG-1

(4,85 W/(mK)) z głębokości 4196,5 m, podczas gdy maksymalne wartości ciepła właściwego (1400 J/(kg · K) przy temperaturze 150°C) charakteryzują piaskowiec triasu środkowego pobrany z otworu Krośniewice IG-1 z głębokości 4563,2 m. Należy jednak pamiętać, że badania parametrów termicznych stanowią jeden z wielu elementów zintegrowanej analizy poszukiwania optymalnej osadowej skały zbiornikowej dla EGS. Jedynie wspólna interpretacja wyników badań petrofizycznych (w tym termicznych), petrologicznych i mechanicznych umożliwi uzyskanie pełnego obrazu skały zbiornikowej.

Prace wykonano na zamówienie Ministra Środowiska za środki finansowe wypłacone przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Autorzy składają podziękowania Pani Marcie Wróblewskiej za pomoc przy przeprowadzeniu badań termicznych.

LITERATURA

- MIKOŚ T., STEWARSKI E., 1977 — Fizyka górotworu. Cz. 2, Właściwości fizyczne skał, Kraków.
- PLEWA S., 1994 — Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- STOCH L., 1996 — Metody analizy termicznej, Materiały konferencyjne: Szkoła Analizy Termicznej, 15–19 kwietnia 1996, Zakopane.
- SZUMERA M., 2011 — Zaawansowane metody badań. Kraków.
- TESTER J.W., ANDERSON B.J., BATCHELOR A.S., BLACKWELL D.D., DIPIPO R., DRAKE, E.M., GARNISH J., LIVESAY B., MOORE M.C., NICHOLS K., PETTY S., TOKSOZ M.N., VEATCH, JR. R.W., 2006 — The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. Massachusetts Institute of Technology, <http://geothermal.inel.gov>

THERMAL PARAMETERS CHARACTERISTICS OF SEDIMENTARY ROCKS FORMING PETROGEO THERMAL RESERVOIRS IN THE CENTRAL PART OF THE POLISH LOWLANDS

ABSTRACT

The paper presents the results of thermal analyzes such as thermal conductivity and specific heat, carried out on samples of sedimentary rocks (sandstones, limestones, siltstones) taken from deep boreholes located in the central part of the Polish Lowlands. This area, covers the Mogilno-Lódź Trough region and a small part of the Kujawy Swell and Fore-Sudetic regions, was selected as a potential location for EGS installation in sedimentary rocks. In the selected area, prospects for building closed geothermal systems have been indicated in the Middle Triassic, Lower Triassic, Lower Permian and Carboniferous rocks. Thermal analyzes on the rock samples were performed.

Thermal conductivity was designated for 24 samples from six wells. All values were measured for dry samples in two directions: perpendicular and parallel. Specific heat was designated for 20 samples from eleven wells. Sandstones are characterized by a maximum thermal parameters.

KEY WORDS

EGS, sedimentary rocks, thermal conductivity, specific heat