



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

Zasoby geotermalne Polski – metodologia oceny potencjału geoenergetycznego.

Prof. dr hab. inż. Jacek Zimny

Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

1. Wprowadzenie.

Energia zasobów geotermicznych jest wciąż drugorzędny, ale coraz istotniejszym składnikiem sektora energetycznego na świecie.

Wobec stale malejących zasobów kopalin, zanieczyszczenia środowiska naturalnego oraz braku dostępności wielu państw do złóż surowców energetycznych – zbliża się coraz szybciej era ekoenergetyki. Epoka czystych technologii energetycznych, w których wykorzystanie ogromnych zasobów m.in. ciepła Ziemi, zacznie spełniać już wkrótce tę samą rolę co energia surowców energetycznych kopalnych (węgiel, ropa, gaz).

Pierwsze w Polsce, prace w tym zakresie rozpoczął prof. Julian Sokołowski (1920-2004), który stworzył w Krakowie główny ośrodek rozwoju teorii i praktyki nowych obszarów nauki i techniki zwanych geosynoptyką, geoenergetyką i geotermią.

W niniejszej pracy przedstawiona zostanie metodologia oceny zasobów geoenergetycznych Polski, w świetle dotychczasowych prac oraz badań potencjału geoenergetycznego Polski do głębokości 3km, 5km i 7km – jak zaleca UNIDO i Unia Europejska.

2. Metodyka oceny zasobów geotermicznych.

Praca zawiera wyniki oceny dostępnej bazy danych potencjału geoenergetycznego Polski, prowadzonej od roku 1977 (J. Sokołowski, J. Sokołowska) wg metodyki międzynarodowej (ARB) stosowanej w krajach UE (ocena wg zasobów kategorii H₀ i H₁).

Definicje podstawowe [1,2,3,5,6,10]:

- dostępną bazę zasobów geotermicznych stanowi ciepło zawarte w górotworze do wybranej głębokości, określone od temperatury złoża do średniej temperatury rocznej powietrza danego terenu,

Stowarzyszenie wpisane pod numerem KRS: 0000071056

Nr konta: BOŚ 46 1540 1115 2044 6070 5574 0001

NIP 677-17-11-239, REGON: 350833720



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

- zasoby geotermiczne kategorii H_0 stanowią fragment dostępnej bazy zasobów odniesionej do konkretnej warstwy geologicznej (o znanej temperaturze złoża, miąższości, porowatości i pojemności cieplnej skał i wód złożowych),
- zasoby geotermiczne kategorii H_1 stanowią 1/3 zasobów H_0 obliczonych do umownej temperatury końcowej 25°C,
- zasoby geotermalne –to ilość ciepła zawartego w skorupie Ziemi, którego nośnikiem są wody geotermalne lub płyn (np. woda) wprowadzone do struktur skalnych.

Do tych zasobów zalicza się ciepło o temperaturze powyżej 20°C, zaś wody podziemne o tych cechach nazywa się wodami geotermalnymi (J. Sokołowski, R. Ney, W. Górecki).

W zależności od sposobu uzyskiwania ciepła geotermalnego, można wyróżnić 2 rodzaje zasobów geotermalnych:

- zasoby hydrogeotermalne (ZHGT) –nośnikiem energii cieplnej są najczęściej swobodne wody podziemne, eksploatowane otworami wiertniczymi lub bezpośrednio ze źródła;
- zasoby petrogeotermalne (ZPGT) –nośnikiem energii cieplnej jest najczęściej woda doprowadzona otworami wiertniczymi do gorących skał.

Zasoby geotermalne występują na obszarze przeszło 80% powierzchni Polski, stanowią ogromne bogactwo narodowe, które winno stanowić podstawę nowej strategii rozwoju społeczno –gospodarczego kraju, zmierzającej do pełnej samowystarczalności energetycznej państwa w krótkim czasie (do roku 2020).

3. Dostępne zasoby geotermalne Polski.

Zasoby te obliczało się dotychczas do głębokości 3000m; aktualnie do 5000m (jako głębokości opłacalnego uzyskiwania energii geotermalnej w związku z gwałtownym wzrostem cen kopalnych surowców energetycznych) oraz do 7000m wg zaleceń UE (jako głębokości zasobów dostępnych, bilansowych w bliskiej przyszłości 10-20 lat).

Metodyka oceny tych zasobów opiera się na fundamentalnych pracach autorów zagranicznych m.in. L. Muffler (1975), R. Cataldi (1977), A.C. Gringarten (1979), R. Haenel (1988) oraz polskich J. Sokołowski (od 1975), J. Sokołowska (1985), R. Ney (1987), W. Górecki, W. Strzetelski (1990).

Stowarzyszenie wpisane pod numerem KRS: 0000071056

Nr konta: BOŚ 46 1540 1115 2044 6070 5574 0001

NIP 677-17-11-239, REGON: 350833720



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

Dostępny potencjał energetyczny zasobów geotermalnych (ang. ARB) przypadający na jednostkę powierzchni oblicza się wg wzoru [1,2,3]:

$$E_{DZG} = (ARB) = v_s \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{T_s - T_0}{2A} \left[\text{K/km}^2 \right] \quad (1)$$

gdzie:

E_{DZG} – energia dostępnych zasobów geotermalnych, [J/km²]

v_s – objętość skał od danej głębokości (3,5,7km) do powierzchni ziemi, [m³, km³],

ρ_s – średnia gęstość właściwa skał w profilu, [kg/m³], (np. do 3000m=2200kg/m³),

c_s – średnia pojemność cieplna właściwa skał w profilu, [J/kg°C],

T_s – temperatura skał na danej głębokości (np. 3, 5, 7 km), [°C],

T_0 – średnia temperatura roczna na powierzchni ziemi, [°C],

A – powierzchnia obszaru obliczeniowego [m²].

Dostępne zasoby energii geotermalnej w Polsce zostały oszacowane po raz pierwszy w latach 1980-90 do głębokości 3 km a także do 5 km i 7 km dla całego kraju (przez Juliana Sokołowskiego i Józefę Sokołowską) [6,7,8].

W obliczeniach przyjęto stałą średnią pojemność cieplną skał $c_s=2,5 \text{ MJ/m}^3\text{°C}$ (dolomity, margle, wapienie o niskiej porowatości, iły i piaskowce zawodnione o porowatości 20%). Dla słupów skał o powierzchni 1 m² i wysokości 3 km, 5 km i 7 km oszacowano pojemność cieplną skał, która wynosi odpowiednio 7,5 GJ, 12,5 GJ oraz 17,5 GJ na 1 m³ objętości skał.

W ten sposób obliczono potencjalne zasoby ciepła geotermalnego w poszczególnych jednostkach geologicznych w funkcji głębokości do 3, 5 i 7 km.

4. Energia i moc cieplna możliwa do pozyskania z zasobów geotermalnych.

Ilość tej energii, możliwa do pozyskania z zasobów dostępnych (ARB) zależy od parametrów zbiornikowych złoża (skały, woda) oraz możliwości technologicznych eksploatacji energii z zasobów geotermalnych.

Stosunek entalpii uzyskanej ze złoża H_1 do entalpii początkowej złoża geotermalnego H_0 określony jest współczynnikiem wydobycia (szczerpania) R_0 [1, 11]:



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

$$R_0 = \frac{H_1}{H_0} [\%] \quad (2)$$

gdzie:

R_0 – współczynnik wydobywania (szczerpania),

H_1 – entalpia (energia cieplna) wydobyta ze złoża [J],

H_0 – entalpia (energia zgromadzona) w złożu; zasoby dostępne (ARB), [J].

Współczynnik R , w praktyce (przy wielootworowej eksploatacji wód geotermalnych, dublety i single) może osiągnąć wartość 0,35. W obliczeniach teoretycznych może osiągnąć wartość 0,65. Wartość zalecana $R=0,3 \div 0,33$, na podstawie wieloletniej praktyki w UE stosunek $H_1:H_0 \leq 1:3$.

Tę właśnie wartość przyjęto we wszystkich ocenach zasobów energii geotermalnej w Polsce przez J. Sokołowskiego i jego współpracowników [7,8,9,10,11,12].

Dla oceny zasobów zbiorników wód geotermalnych, stosuje się również bezwymiarowy, uogólniony współczynnik mocy F :

$$F = \frac{N_{wy}}{N_{we}}$$

gdzie:

N_{wy} – moc efektywna wyjściowa (na powierzchni ziemi) [W],

N_{we} – moc ponoszona wejściowa (dotyczy instalacji systemu geotermalnego) [W].

5. Efektywna moc wyjściowa ujęcia geotermalnego.

Moc systemu geotermalnego, odpowiadająca średniej rocznej mocy cieplnej, odbieranej z wnętrza ziemi na wymiennikach ciepła w elektrociepłowni (na powierzchni) określa się z zależności [1]:

$$N_{wy} = k \cdot Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_w - T_z) \quad [W] \quad (3)$$

gdzie:

k – średni roczny współczynnik obciążenia ujęcia geotermalnego (zakres $0 \div 1$),

Q – nominalny wydatek eksploatacyjny wody geotermalnej [m^3/s],



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

ρ_w – gęstość wody geotermalnej [kg/m³],

c_w – ciepło właściwe wody geotermalnej [J/kg°C],

T_w – temperatura eksploatowanej wody geotermalnej [°C],

T_z – temperatura wody geotermalnej po odbiorze jej ciepła [°C].

Zakładając, że temperatura wody geotermalnej po oddaniu ciepła na wymiennikach, wynosić będzie na powrocie do Ziemi 25°C, otrzymamy uproszczoną postać wzoru (3):

$$N_{wy} = 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot k \cdot Q \cdot (T_w - 25) \quad [\text{MW}] \quad (4)$$

Jeżeli przyjmiemy $k=1$ (praca ciągła w całym roku, ujęcie wody geotermalnej ze stałą mocą cieplną) to zależność (4) przyjmie postać:

$$N_{wy} = 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot Q \cdot (T_w - 25) \quad [\text{MW}] \quad (5)$$

6. Ekwiwalentna moc wyjściowa ujęcia geotermalnego.

Jest to moc, odpowiadająca nakładom inwestycyjnym na uruchomienie ujęcia geotermalnego (np. dubletu) oraz kosztom jego eksploatacji w jednostce czasu, wyrażonym w ekwiwalencie mocy cieplnej N_{wy} [1]:

$$N_{invest} = 3,17 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{J}{t} + K_a \right) \cdot \frac{W}{C_p} \quad [\text{MW}] \quad (6)$$

gdzie:

J – łączne nakłady kapitałowe (inwestycyjne) budowy ujęcia wody geotermalnej [zł],

t – okres funkcjonowania instalacji [lata], przyjmuje się 25 lat,

K_a – roczne koszty eksploatacji dubletu [zł/rok],

W – wartość opałowa alternatywnego paliwa kopalnego [MJ/jedn.],

C_p – cena alternatywnego paliwa kopalnego [zł/ jedn. paliwa np. tona lub m³].



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

7. Zasoby dyspozycyjne wód geotermalnych, ich potencjał energetyczny.

Zasoby dyspozycyjne ED stanowią udokumentowaną część zasobów statycznych, wydobywanych (ARB) – których wykorzystanie jest uzasadnione ekonomicznie; określone są jako energia możliwa do pozyskania w ciągu roku [1,3,10]:

$$E_D = Q \cdot (T_t - 25) \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot 8760 \quad [\text{J/rok}] \quad (7)$$

gdzie:

Q – nominalna wydajność otworu wydobywczego [m^3/h], $Q_{\max} = 300 \text{ [m}^3/\text{h]}$,

T_t – temperatura w stropie warstwy wodonośnej [$^{\circ}\text{C}$],

ρ_w – gęstość wody geotermalnej,

c_w – ciepło właściwe wody geotermalnej,

8760 – czas eksploatacji źródła geotermalnego (dublet), 1 rok = 8760 godz.

8. Zasoby energii geotermalnej w głównych jednostkach litostratygraficznych przekroju Ziemi.

a) Sposób I obliczeń – stosowany w Unii Europejskiej [1,3,4,11]:

- Ilość energii cieplnej zgromadzonej w danym zbiorniku wód geotermalnych (skały i wody wypełniające przestrzenie porowe) określa się stosując model objętościowy ekstrakcji ciepła według wzoru [1,3,4,11]:

$$H_0 = [(1 - \phi) \cdot \rho_s \cdot c_s + \phi \cdot c_w \cdot \rho_w] \cdot (T_t - T_0) \cdot A \cdot \Delta Z \quad [\text{GJ, MJ}] \quad (8)$$

gdzie:

H_0 – ilość ciepła w złożu, zasoby dostępne (ARB), [J],

ϕ – współczynnik porowatości skał,

ρ_s – średnia gęstość właściwa skał zbiornikowych, [kg/m^3],

c_s – pojemność cieplna właściwa skał zbiornikowych, [$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$],

c_w – pojemność cieplna właściwa wód geotermalnych, [$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$],

T_t – temperatura wody w stropie zbiornika, [$^{\circ}\text{C}$],

T_0 – temperatura średnio roczna powierzchni ziemi, [$^{\circ}\text{C}$],



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

A –powierzchnia zbiornika obszaru obliczeniowego, [m²],

ΔZ –miąższość zbiornika geotermalnego/kompleksu skalnego, [m].

- Ilość ciepła możliwą do odzyskania w procesie eksploatacji wód geotermalnych ze zbiornika geotermalnego, tzw. zasoby kategorii H1, określa się stosując współczynnik odzyskania (czerpania) [1,3,4,11]:

$$R_0 = 0,33 \cdot \frac{(T_t - T_z)}{(T_t - T_0)} \quad (9)$$

gdzie:

T_z –temperatura wody zatłaczanej do zbiornika geotermalnego, [°C]; przyjmuje się $T_z = 25^\circ\text{C}$,

T_0 –temperatura powierzchni ziemi.

- Zasoby rozpoznane energii ciepła wód geotermalnych można oszacować z zależności:

$$H_1 = R_0 \cdot H_0 \text{ [GJ]} \quad (10)$$

Obliczenia wg powyższej metodyki oceny zasobów energetycznych Polski do głębokości 3,5 i 7km przeprowadzono w zespole J. Sokołowskiego przy współpracy J. Sokołowskiej, A. Tomaszewskiego i J. Zimnego w latach 1995-2004 [6,7,8,9,10,11,12] oraz w zespole S. Ostaficzuka z udziałem Z. Małolepszego –z zastosowaniem programu komputerowego Geographix Exploration Systems (GES 7.7) [3].

- b) Sposób II obliczeń –opracowany i stosowany przez J. Sokołowskiego i J. Sokołowską oraz współpracowników od 1987 do 2004r. według wzoru [3,6,7,10,11]:

$$H_1 = \phi \cdot c_w \cdot \rho_w (T_t - T_z) \cdot A \cdot \Delta Z \text{ [GJ]} \quad (11)$$

gdzie:

parametry i jednostki jak we wzorach sposobu I.



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

9. Porównanie wyników obliczeń, wnioski.

Po przekształceniu wzoru (8) z uwzględnieniem współczynnika odzyskania ciepła R_0 (9), w pierwszym sposobie obliczeń wzór do oceny wielkości zasobów ciepła H_1 ma postać:

$$H_0 = [(1-\phi) \cdot \rho_s \cdot c_s + \phi \cdot c_w \cdot \rho_w] \cdot (T_t - T_0) \cdot A \cdot \Delta Z \cdot 0,33 \frac{T_t - T_z}{T_t - T_0} \quad (12)$$

Po uproszczeniu:

$$H_1 = 0,33 [(1-\phi) \cdot \rho_s \cdot c_s + \phi \cdot c_w \cdot \rho_w] \cdot (T_t - T_0) \cdot A \cdot \Delta Z$$

Porównanie otrzymanego wzoru (13) z wzorem J. Sokołowskiego (11) wykazuje, że różnicę w obliczeniach może powodować jedynie człon:

$$0,33 [(1-\phi) \cdot \rho_s \cdot c_s] \quad (14)$$

tj. doświadczalnie wyznaczony współczynnik o wartości 0,33, współczynnik porowatości skał ϕ , gęstość właściwa skał zbiornikowych ρ_s oraz pojemność cieplna właściwa skał zbiornikowych c_s . Różnica wyników obliczeń, rozpoznanych zasobów ciepła H_1 dwoma sposobami, przeprowadzona dla wielu województw w Polsce [7,8,9,11] jest niewielka, waha się w granicach 4 do 5% błęd, przy czym obliczeniowa wartość wyższa zasobów występuje w drugim sposobie obliczeń.

Wnioski końcowe:

- stosowanie pierwszego sposobu obliczeń jest znacznie trudniejsze, z uwagi na większą złożoność opisu matematycznego i koniecznymi do obliczeń wieloma danymi szczegółowymi, dotyczącymi własności fizykochemicznych skał w funkcji zmienności przestrzennej (x,y,z),
- wyniki obliczeń uzyskane drugim sposobem są obarczone tak małym błędem (rzędu 4 do 5%), że można bez zastrzeżeń zalecać tę metodykę szacunku jako właściwą i prostszą,
- przedstawione wyżej wnioski potwierdzają dane rzeczywiste dotyczące oceny zasobów geotermalnych dla blisko 300 gmin w Polsce.



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA

POLISH GEOTHERMAL ASSOCIATION

30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 paw B3, pok. 206, POLAND

Tel. +48 12 6173413, Fax. +48 12 6173113, e-mail: zimny@imir.agh.edu.pl

Literatura:

1. Górecki W.; Atlas zasobów energii geotermalnej na niżu Polskim. GEOS AGH, Kraków 1995.
2. Górecki W.; Metodyka oceny zasobów energii i wód geotermalnych. GEOS, Kraków 1993.
3. Małolepszy Z. (red); Energia geotermalna w kopalniach podziemnych. Prace Wydziału Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, nr 17, 2002.
4. Muffler L.J., Cattaldi R.; Methodology for regional assesment of geothermal resources. Geothermics, vol.7, nr 2/4, Pisa, Italia 1977.
5. Plewa S.; Termiczne własności skał. PIG, Warszawa 1972.
6. Sokołowska J.; Metodyka poszukiwania złóż kopalin płynnych. Studia i rozprawy PAN, CPPGSMIE, Kraków 1991, nr 10.
7. Sokołowska J.; Ocena zasobów geotermalnych. Materiały Polskiej Szkoły Geotermalnej. III Kurs. Kraków –Straszęcin 1997.
8. Sokołowski J.: Geotermalny potencjał Polski. CPPGSMIE PAN. Kraków 1995 (zastrzeżone).
9. Sokołowski J.; Prowincje, baseny i zbiorniki geostrukturalne, geotermalne i ropogazonośne Polski. CPPGSMIE PAN. Kraków 1985 (zastrzeżone)
10. Sokołowski J. (red); Metody oceny zasobów i zasady projektowania zakładów geotermalnych. CPPGSMIE PAN, Kraków 1996.
11. Sokołowski J., Tomaszewski A.; Ocena potencjalnych zasobów energii cieplnej wód geotermalnych w utworach kredy i jury niżu polskiego. CPPGSMIE PAN, Kraków-Warszawa, 1995, (zastrzeżone niepublikowane).
12. Sokołowski J., Zimny J. Kozłowski R.; Polska XXI wieku nowa wizja i strategia rozwoju, Wydawnictwo Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego, Warszawa 2005.

Stowarzyszenie wpisane pod numerem KRS: 0000071056

Nr konta: BOŚ 46 1540 1115 2044 6070 5574 0001

NIP 677-17-11-239, REGON: 350833720