

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska  
Katedra Surowców Energetycznych

STRZESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**ANALIZA I OCENA MOŻLIWOŚCI PRODUKCJI ENERGII  
ELEKTRYCZNEJ PRZY WYKORZYSTANIU ENERGII CIEPLNEJ  
ZAKUMULOWANEJ W WODACH GEOTERMALNYCH NA  
OBSZARZE WOJEWÓDZTWA MAŁOPOLSKIEGO**

mgr inż. Michał Kaczmarczyk

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Barbara Tomaszewska, prof. AGH

Kraków, 28.09.2016

Celem pracy było przeanalizowanie budowy geologicznej województwa małopolskiego pod kątem występowania oraz możliwości wykorzystania wód geotermalnych do celów produkcji energii elektrycznej oraz wskazanie najbardziej perspektywicznych lokalizacji o największym potencjale możliwej do uzyskania mocy elektrowni. Przyjęte zostały następujące tezy pracy:

- Analiza budowy geologicznej oraz parametrów hydrogeologicznych pod kątem pozyskania energii geotermalnej, pozwala określić potencjalną produkcję energii elektrycznej jaką można uzyskać w elektrowni geotermalnej.
- Decydujący wpływ na efektywność produkcji energii elektrycznej oraz na wielkość mocy zainstalowanej elektrowni geotermalnej mają: temperatura wody geotermalnej oraz wydajność otworu produkcyjnego determinowane przez parametry fizyczne ośrodka skalnego.
- Zasadność wykorzystania energii zakumulowanej w wodach geotermalnych o niskiej entalpii do produkcji energii elektrycznej, w oparciu o wykorzystanie organicznych lub nieorganicznych czynników roboczych, potwierdzają działające elektrownie geotermalne na świecie.

Aby określić parametry temperatury oraz wydajności dla ujęć geotermalnych, jako czynnika koniecznego do podjęcia rozważań nad produkcją energii elektrycznej, przeanalizowane zostały rozwiązania technologiczne stosowane w Europie i na świecie. Stwierdzono na tej podstawie, że metodami produkcji prądu elektrycznego przy wykorzystaniu energii wód geotermalnych o niskiej entalpii są Obieg Organiczny Rankine'a (ORC) oraz Cykl Kaliny. Określenie niska entalpia oznacza w tym wypadku złoża o temperaturze nieprzekraczającej 90–125°C (Muffler i Cataldi, 1978; Hochstein, 1990; Benderitter i Cormy, 1990; Lee, 1996). Entalpia definiowana jest jako funkcja stanu, mająca wymiar energii i wyrażana jest w J/kg, stąd nie należy utożsamiać jej i stawiać na równi z temperaturą ale traktować jako parametr uzupełniający w stosunku do temperatury, przy klasyfikacji zasobów geotermalnych (Muffler i Cataldi, 1978; Hochstein, 1990; Benderitter i Cormy, 1990; Lee, 1996). Spośród instalacji geotermalnych wykorzystujących zasoby wód o temperaturze nie przekraczającej 150°C w pracy przeanalizowano elektrownie w: Chena Hot Springs, Neustadt Glewe, Altheim, Bad-Blumau, oraz instalacje oparte na Cyklu Kaliny w: Husaviku, Unterhaching oraz Bruchsal. Wynikało to bezpośrednio z parametrów wody geotermalnej w tych instalacjach, zbliżonych do polskich uwarunkowań hydrogeotermalnych.

Kluczowymi parametrami, wpływającymi na możliwość wytwarzania energii elektrycznej jest temperatura wody oraz wydajność ujęcia geotermalnego. Temperatura

górotworu w największym stopniu determinowana jest przez gęstość ziemskiego strumienia ciepłego, w drugiej kolejności przez właściwości termiczne skał (przewodność cieplna, ciepło właściwe) w badanym profilu litologicznym. Wydajność potencjalnych ujęć geotermalnych uzależniona jest od wielu czynników litostratygraficznych i tektoniki górotworu. Oszacowana może być przede wszystkim na podstawie szczegółowej analizy danych z otworów wiertniczych, którymi rozpatrywane struktury geologiczne zostały nawiercone i rozpoznane.

Na podstawie analizy danych literaturowych (Mirolli et al., 2002; Brasz i Bilbow, 2004; DiPippo 2005; Borsukiewicz-Gozdur et al., 2007; DiPippo, 2012; Borsukiewicz-Gozdur i in., 2013; Akbari et al., 2014; Bujakowski, Tomaszewska [red.], 2014) oraz biorąc pod uwagę parametry pracy elektrowni geotermalnych na świecie, w rozważaniach związanych z analizą możliwości produkcji energii elektrycznej z wód geotermalnych w Małopolsce, jako minimalną wartość temperatury wód przyjęto 74°C, a wydajność ujęcia geotermalnego 100 m<sup>3</sup>/h. Założone kryterium temperatury wynika z parametrów pracy elektrowni ORC w Chena Hot Spring na Alasce, gdzie do produkcji energii elektrycznej wykorzystywana jest najniższa na świecie temperatura wody geotermalnej (Lund, 2006; Bertani, 2015; Mink et al., 2015). W przypadku strumienia objętościowego wody geotermalnej, przyjęta wartość 100 m<sup>3</sup>/h również podyktowana jest zbliżoną wydajnością ujęć geotermalnych w Chena Hot Spring na Alasce (115 m<sup>3</sup>/h) oraz w Neustadt-Glewe (110 m<sup>3</sup>/h) w Niemczech (Lund, 2006; Bertani, 2007; Knappek et al., 2007; Wolfgramm et al., 2007; Whittaker, 2009; Herzberger et al., 2010; Bertani, 2015; Ganz et al., 2013; Mink et al., 2015; Ragnarsson, 2015; Weber et al., 2015).

W celu określenia perspektywicznych lokalizacji przeprowadzona została analiza budowy geologicznej oraz parametrów hydrogeologicznych na obszarze województwa małopolskiego, które determinują możliwość występowania i eksploatacji wody geotermalnej o wyżej wymienionych parametrach. Wynika to z faktu, że temperatura wody geotermalnej oraz wydajność otworu produkcyjnego determinowane są przez parametry fizyczne ośrodka skalnego. Do rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeotermalnych wykorzystane zostały dane ze 184 otworów wiertniczych zlokalizowanych na obszarze badań. Z uwagi na cel pracy kluczowa była informacja geologiczna pozyskana z wierceń o głębokości przekraczającej 2000 m. Dokumentacja każdego z otworów wiertniczych została przeanalizowana pod kątem pozyskania danych termicznych: ustabilizowanego profilowania temperatury, temperatury na dnie otworu wiertniczego oraz nieustabilizowanego profilu temperatury. Dokumentację otworową pozyskano w Narodowym Archiwum Geologicznym Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie, w archiwum firmy Polskie Górnictwo

Naftowe i Gazownictwo S.A znajdującym się w Krakowie, a także w archiwum firmy Geotermia Podhalańska S.A. w Bańskiej Niżnej. Tak pozyskane dane zostały uporządkowane i przeanalizowane pod kątem przydatności dla celów niniejszej pracy.

Efekty przeprowadzonych badań i obliczeń przedstawione zostały na mapach rozkładu gradientu geotermicznego oraz na mapach wgłębnego rozkładu temperatur na głębokościach 1000, 2000, 3000 i 4000 m p.p.t. Analiza danych termicznych przedstawionych na mapach wgłębnego rozkładu temperatur pozwoliła na wskazanie najkorzystniejszych warunków termicznych z punktu widzenia produkcji energii elektrycznej. Przy uwzględnieniu danych dotyczących potencjalnej wydajności zbiorników geotermalnych na obszarze Małopolski, do dalszej analizy wytypowano istniejące otwory produkcyjne: Bańska PGP-1, Bańska IG-1, Bańska PGP-3, Chochołów PIG-1. Dodatkowo analizie postanowiono poddać otwór Bukowina PGP-1, pomimo tego, że jego parametry nie spełniają założonych minimalnych kryteriów temperatury i wydajności. Jednakże celem przeprowadzonych obliczeń dla tego ujęcia, jako skrajnie niekorzystnego, było wykazanie czy przyjęte założenia początkowe zostały określone prawidłowo.

Mimo, że do szczegółowej analizy wybrane zostały istniejące otwory wiertnicze, wykorzystując przedstawione w pracy modele obliczeniowe dla technologii ORC oraz Cyklu Kaliny, w przyszłości można podjąć rozważania nad oszacowaniem potencjalnych mocy i produkcji energii dla obszarów, na których możliwe jest zastosowanie technologii EGS. Wykorzystanie ciepła suchych gorących skał (ang. hot dry rocks) w ramach EGS może bowiem stanowić w niedalekiej przyszłości alternatywę dla obszarów gdzie nie stwierdzono występowania wód geotermalnych, pod warunkiem popularyzacji tego typu instalacji i optymalizacji kosztów ich wykonania.

W każdym z rozpatrywanych przypadków założono dwa warianty pracy systemu: I – wykorzystanie maksymalnego strumienia wody geotermalnej możliwej do pozyskania z ujęcia geotermalnego, II – częściowe wykorzystanie strumienia pozyskiwanej wody, zakładając możliwość zagospodarowania jego części do produkcji energii cieplnej lub innych celów, np. rekreacji (wariant dla otworów wiertniczych o największej wydajności: Bańska PGP-1, Bańska PGP-3).

W trakcie prowadzenia badań opracowano dwa modele termodynamiczne. Z punktu widzenia technologii produkcji energii elektrycznej, do implementacji w warunkach polskich możliwe są zarówno Obieg Organiczny Rankine'a, jak Cykl Kaliny, przy czym zdecydowanie wyższe moce brutto elektrowni uzyskano dla drugiej z wymienionych technologii, nawet do

48% w porównaniu z ORC. Uzyskane wyniki dotyczące potencjalnej mocy brutto elektrowni wraz analizą instalacji działających na świecie, potwierdziły zasadność wykorzystania energii zakumulowanej w wodach geotermalnych o niskiej entalpii do produkcji energii elektrycznej, co wskazuje na prawdziwość postawionej w pracy tezy: „Zasadność wykorzystania energii zakumulowanej w wodach geotermalnych o niskiej entalpii do produkcji energii elektrycznej, w oparciu o wykorzystanie organicznych lub nieorganicznych czynników roboczych, potwierdzają działające elektrownie geotermalne na świecie”. Moc brutto elektrowni jaka jest możliwa do uzyskania w województwie małopolskim koresponduje z mocami brutto elektrowni geotermalnych pracujących na świecie, czego przykładem są instalacje w Chena Hot Springs (moc elektrowni 730 kW), Altheim (1000 kW) Bad-Blumau (250 kW) i Bruchsal (550 kW).

Przeprowadzona analiza oraz obliczenia wskazują, że na obszarze województwa małopolskiego można wytypować istniejące otwory oraz potencjalne strefy zbiornikowe, które w sprzyjających warunkach mogą zostać zagospodarowane do produkcji energii elektrycznej. Potencjalna moc brutto elektrowni geotermalnej, obliczona dla wybranych do badań otworów ujęć geotermalnych, nie przekroczy w przypadku ORC 900 kW, a dla Cyklu Kaliny 1600 kW. W przypadku produkcji energii elektrycznej brutto, jej wielkość w przypadku technologii ORC nie przekroczy 3300 MWh, a w przypadku Cyklu Kaliny nie przekroczy 6300 MWh.

Wyniki badań wskazują, że przy założeniu wykorzystania pełnego strumienia wody geotermalnej wydobywanej na powierzchnię terenu (wariant I obliczeń), największa moc brutto jest możliwa do uzyskania w przypadku otworu wiertniczego Bańska PGP-1 i wynosi 1568,23 kW (przy sprawności 7%) w najkorzystniejszym z wariantów, tj. przy założeniu wykorzystania Cyklu Kaliny i udziale 87% amoniaku w mieszaninie czynnej. Moc powyżej 500 kW (823,68 kW dla strumienia wody geotermalnej 290 m<sup>3</sup>/h) jest ponadto możliwa do uzyskania dla otworu wiertniczego Bańska PGP-3. Wyniki obliczeń potwierdzają kluczowe znaczenia jakie dla produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu wód geotermalnych mają temperatura wody geotermalnej oraz wydajność otworu produkcyjnego. Ujęcia Bańska PGP-1 i Bańska PGP-3 charakteryzują się zarówno najwyższą temperaturą wody geotermalnej, w obu przypadkach 86°C, jak i wydajnością otworów produkcyjnych wynoszącą odpowiednio 550 m<sup>3</sup>/h i 290 m<sup>3</sup>/h. Potwierdza to tezę przyjętą w pracy: „Decydujący wpływ na efektywność produkcji energii elektrycznej oraz na wielkość mocy zainstalowanej elektrowni geotermalnej mają: temperatura wody geotermalnej oraz wydajność otworu produkcyjnego

determinowane przez parametry fizyczne ośrodka skalnego.” Spośród analizowanych lokalizacji największym potencjałem dysponuje Podhalański System Geotermalny, szczególnie otwory wiertnicze Bańska PGP-1 oraz Bańska PGP-3. Potwierdzona została zatem słuszność przyjętej w pracy tezy: „Analiza budowy geologicznej oraz parametrów hydrogeologicznych pod kątem pozyskania energii geotermalnej, pozwala określić potencjalną produkcję energii elektrycznej jaką można uzyskać w elektrowni geotermalnej”.

Spośród analizowanych technologii i czynników roboczych, zdecydowanie najkorzystniej prezentują się wyniki uzyskane dla Cyklu Kaliny przy zastosowaniu mieszaniny amoniak/woda o stężeniu amoniaku 87%. Dotyczy to wszystkich analizowanych rozwiązań. Natomiast w odniesieniu do systemu ORC, z wytypowanych do badań organicznych czynników roboczych, jako najbardziej korzystny należy wskazać suchy czynnik roboczy R245fa oraz mokry – R134a.

Jako główny problem przy implementacji rozwiązań ORC i Cyklu Kaliny, należy upatrywać w analizowanym zakresie temperatur wody geotermalnej, niskiej sprawności systemu nie przekraczającej 10%, a w większości przypadków oscylującej na poziomie 6–7%. Jest to efekt wykorzystania do celów produkcji energii elektrycznej wód geotermalnych o temperaturze nieprzekraczającej 90°C. Nie potwierdza się zatem przy analizowanym zakresie temperatur stwierdzenie sformułowane przez Knapka (2007), że Cykl Kaliny ma większą sprawność w stosunku do ORC o ok. 25%. Wartości sprawności dla ORC przy zaokrągleniu do drugiego miejsca po przecinku wynoszą dla suchych czynników roboczych 6%, a dla mokrych czynników roboczych 8%. Dla Cyklu Kaliny sprawność obliczona została na 6% dla mieszaniny zawierającej 85% amoniaku, a dla mieszanin zawierających 87% i 89% amoniaku na 7%. Słuszne jest natomiast twierdzenie, że w przypadku mocy elektrowni, jaka jest możliwa przy zastosowaniu obu systemów, w przypadku Cyklu Kaliny moc jest zdecydowanie większa.

W przypadku systemów ORC największa możliwa do uzyskania moc brutto 823,28 kW (czynnik R134a) dla otworu Bańska PGP-1 jest o 48% mniejsza niż maksymalna moc brutto dla Cyklu Kaliny, która wynosi 1568,23 kW (zawartość amoniaku w mieszaninie 87%).