

Ocena energetycznej jakości zasobów geotermalnych – aspekty termodynamiczny i terminologiczny

Antoni Barbacki¹



Estimation of energetic quality of geothermal resources – thermodynamic and terminological aspects.
Prz. Geol., 60: 117–120.

Abstract. According global terminology Poland is characterized by low-temperature geothermal resources usually named as low enthalpy resources. They are connected mostly with the Mesozoic sedimentary formations with temperatures of waters do not exceed 100°C. In the paper the estimation of thermodynamic parameters of Polish geothermal fields in comparison with selected global resources was presented according using terminology. Geothermal resources were classified with reference to their temperatures, specific enthalpy and specific exergy. The analysis states that the exergy define the quality of the energy content of a geothermal fluid better than the temperatures and enthalpy criterions.

Keywords: thermal water, temperature, exergy, enthalpy

Zasoby geotermalne są zwykle klasyfikowane jako zasoby o niskiej, średniej i wysokiej entalpii na podstawie wartości temperatur płynów termalnych wyznaczanych w warunkach złożowych. Zakresy temperatur używane w tej klasyfikacji są jednak przyjmowane arbitralnie i w sposób dość zróżnicowany. Z prawej strony ryciny 1 przedstawiono najczęściej stosowany podział zasobów geotermalnych według kryterium temperaturowego z jednoczesnym odwołaniem się do pojęcia entalpii zaproponowane przez Mufflera i Cataldiego (1978), Benderittera i Cormy'ego (1990), Hochsteina (1990) oraz Haenela i in. (1988). Użycie parametru temperatury w celu oceny zasobów geotermalnych wynika z łatwości jego pomiaru i powszechnej zrozumiałości. Jednakże sama temperatura nie jest obiektywnym parametrem klasyfikacyjnym. Dwa złoża geotermalne mogą wykazywać przykładowo tę samą temperaturę wynoszącą 100°C i ciśnienie na wypływie 1 bar, ale jedno może zawierać wrzącą wodę, a drugie parę nasyconą. Oba złoża zostałyby zakwalifikowane jako złoża o średniej entalpii według Mufflera i Cataldiego (1978), lecz jako złoża o niskiej entalpii według podziału przyjętego przez pozostałych autorów, mimo że entalpia właściwa pary nasyconej byłaby tutaj ponad sześciokrotnie większa niż entalpia wody wrzącej (wykres na rycinie 1: woda wrząca – 417 kJ/kg, para nasycona – 2675 kJ/kg).

Jak widać, ocena zasobów geotermalnych na podstawie kryterium temperaturowego z odwołaniem do entalpii jest nieuzasadniona i myląca – szczególnie, jeśli mamy do czynienia ze złożami dwufazowymi lub parą termalną. Jedynie na obszarach występowania samych wód termalnych, gdzie entalpia jest niemal liniową funkcją temperatury i temperatura decyduje o jej wartości, przyjęcie takiego kryterium może mieć pewne uzasadnienie.

OCENA ENERGETYCZNEJ JAKOŚCI ZASOBÓW GEOTERMALNYCH NA PODSTAWIE ENTALPII

Powstaje zatem pytanie, czy wartość samej entalpii może stanowić obiektywne kryterium klasyfikowania złóż

geotermalnych. Okazuje się, że przyjęcie wartości entalpii jako wskaźnika energetycznej jakości płynów termalnych, podobnie jak w przypadku temperatury, również prowadzi do niejednoznacznych ocen (Lee, 2001). Termodynamiczna definicja entalpii właściwej jest następująca:

$$h \approx c^w t + pv$$

gdzie dla wody: h – entalpia właściwa wody liczona względem 0°C [kJ/kg], c^w – średnie ciepło właściwe wody [kJ/kgK], t – temperatura [°C], p – ciśnienie [bar], v – objętość właściwa [m³/kg].

Jednak w obszarze kondensatu (woda + para) oraz w obszarze pary (ryc. 1) określanie entalpii dla różnych ciśnień wykonuje się przez wyznaczanie jej przyrostów z uwzględnieniem ciepła parowania i ciepła właściwego pary (Szargut, 1998).

Na rycinie 1 przedstawiono wykres $h-t$ dla różnych wartości ciśnień panujących w płynach termalnych przy założeniu braku mineralizacji i zgazowania (zawartość soli i/lub CO₂ w wodzie i parze wodnej może zmieniać parametry termodynamiczne nawet do kilkunastu procent) (Kestin, 1980).

Polskie złoża geotermalne na rycinie 1 w celu porównawczym przedstawiono na tle bardziej znanych złóż światowych. Usytuowano je na wykresie $h-t$ w postaci punktów o współrzędnych (t , h , p) dla uśrednionych warunków panujących na wypływie z otworów eksploatacyjnych. Polskie eksploatowane złoża geotermalne zajmują na wykresie $h-t$ obszar wody, gdzie wartość ciśnień, jakim poddane są płyny termalne, nieznacznie wpływa na wartość entalpii, natomiast decydujące znaczenie ma wartość temperatury.

Jakość energetyczna polskich złóż oceniana na podstawie wartości entalpii właściwej wygląda znacznie skromniej w stosunku do jakości dużych złóż Islandii, USA, Włoch czy Turcji. Z ryciny 1 wynika, że złoża światowe, z których produkowana jest energia elektryczna (Lardello – Włochy, Nesjavellir – Islandia, Germencik – Turcja, Geysers – USA) wykazują wysoką wartość entalpii, przekraczającą 2000 kJ/kg.

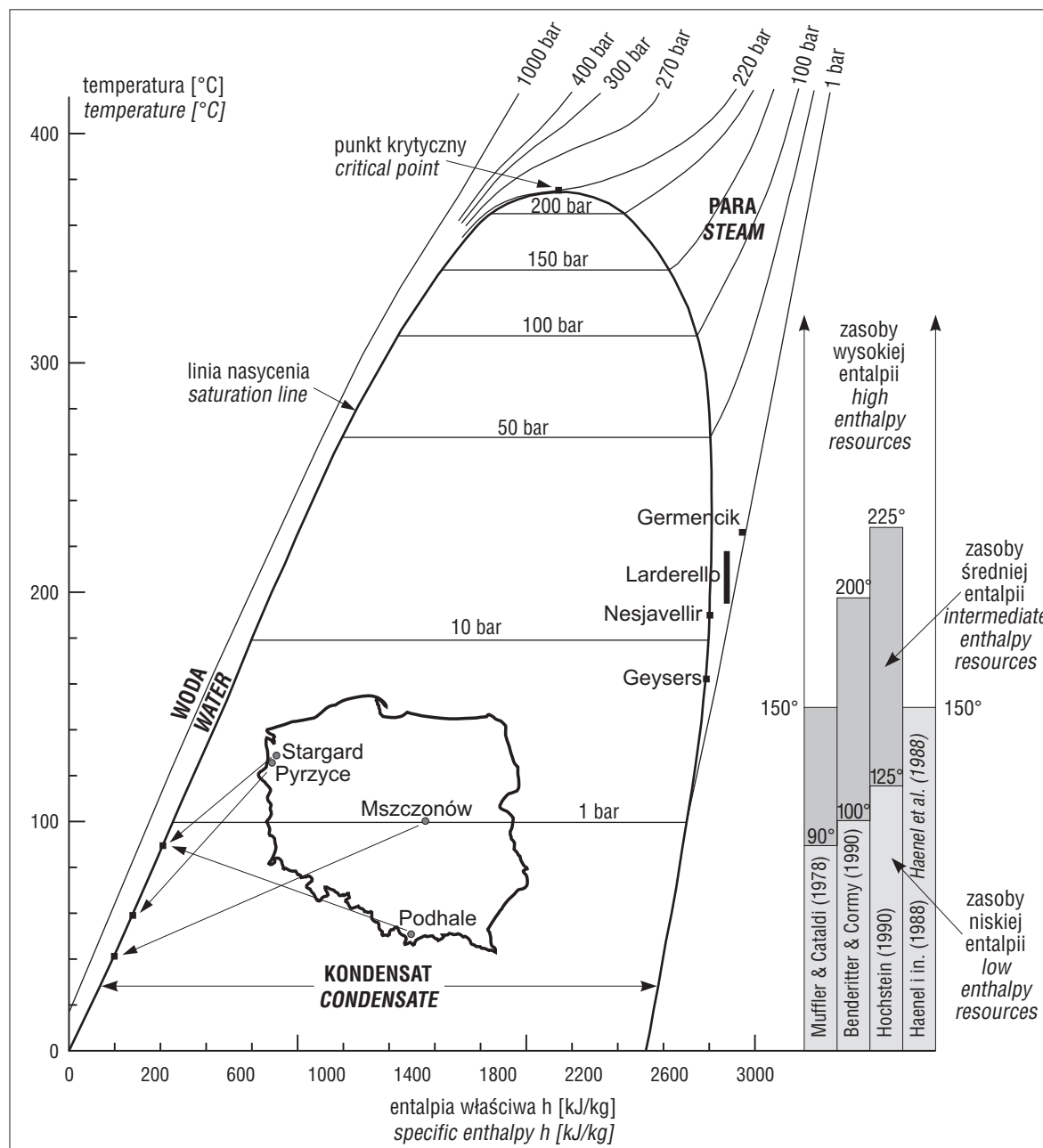
¹Institut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; barbacki@min-pan.krakow.pl.

Jedynie w Polsce centralnej (region Konina, Łowicza) występują przypuszczalnie dolnojurajskie lub triasowe zbiorniki wód termalnych o znacznych wydajnościach i temperaturach przekraczających 100°C, co stwarza realne perspektywy produkcji energii elektrycznej w systemach binarnych, z wykorzystaniem w instalacjach powierzchniowych niskowrzących, pośredniczących płynów roboczych.

Należy jednak podkreślić, że entalpia właściwa stanowi jakościowy, a nie ilościowy wskaźnik wartości energetycznej płynu termalnego. Entalpia właściwa jest parametrem energetycznym odnoszącym się do jednostki masy płynu termalnego, tzn. do 1 kg. W ostatecznej decyzji dotyczącej

możliwości budowy zakładu geotermalnego powinno się zatem uwzględniać całkowitą wartość entalpii, opierając się na stwierdzonych wydajnościach otworów, a więc na totalnej mocy cieplnej.

Jak wskazano wcześniej, wartość entalpii nie stanowi jednoznacznego wskaźnika energetycznej jakości płynów termalnych. Dotyczy to głównie płynów występujących w postaci kondensatów i par termalnych. Przykładowo złoża Geysers w USA i Nesjavellir na Islandii (ryc. 1) wykazują podobne wartości entalpii (ok. 2800 kJ/kg), jednak pod względem energetycznym złożo Nesjavellir prezentuje się korzystniej wskutek występujących tam wyższych wartości temperatur.



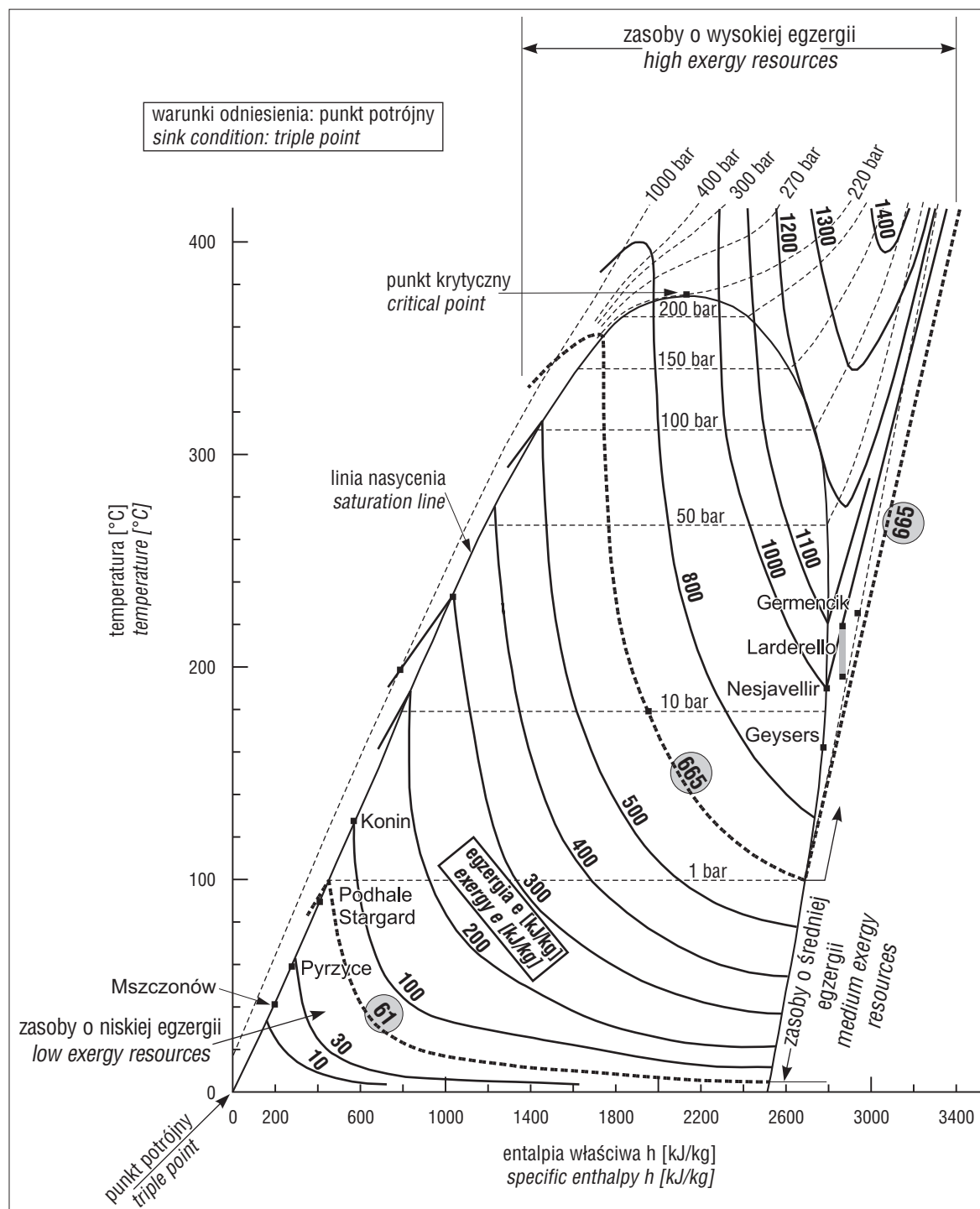
Ryc. 1. Wybrane złoża geotermalne Polski oraz większe złoża światowe usytuowane na wykresie entalpia–temperatura wraz z diagramem klasyfikacji złóż wg kryterium temperaturowego; uśrednione parametry głowicowe złóż światowych wg Lee (2001), Bettagli & Bidiniego (1996), Etemoglu & Cana (2007), Reykjavik Energy (2006) oraz Barbackiego (2012) – zmodyfikowane

Fig. 1. Selected geothermal fields of Poland and larger global fields plotted on the enthalpy–temperature diagram as against conventional temperature classification; average wellhead parameters of global fields after Lee (2001), Bettagli & Bidini (1996), Etemoglu & Can (2007), Reykjavik Energy (2007) and Barbacki (2012) – modified

Uzyskanie parametrów energetycznych złoża Nesjavellir dla płynu znajdującego się w warunkach termodynamicznych otoczenia wymagałoby zatem dostarczenia większej energii aniżeli w przypadku złoża Geysers. Owa nadwyżka energii danego medium w stosunku do energii w przyjętych warunkach otoczenia nosi nazwę egzergii (Szargut, 1998) i stanowi bardziej obiektywną miarę wartości energetycznej płynów geotermalnych niż entalpia.

OCENA ENERGETYCZNEJ JAKOŚCI ZASOBÓW GEOTERMALNYCH NA PODSTAWIE EGZERGII

Ponieważ w różnych regionach świata warunki termodynamiczne otoczenia są odmienne, aby zobiektywizować wartości egzergii podczas klasyfikacji jakości zasobów geotermalnych, jako warunki odniesienia przyjmuje się



Ryc. 2. Wybrane złoża geotermalne Polski oraz większe złoża światowe usytuowane na wykresie entalpia–temperatura–egzergia; uśrednione parametry głowicowe złóż światowych wg Lee (2001), Bettagli & Bidiniego (1996), Etemoğlu & Cana (2007), Reykjavik Energy (2006) oraz Barbackiego (2012) – zmodyfikowane

Fig. 2. Selected geothermal fields of Poland and larger global fields plotted on the enthalpy–temperature–exergy diagram; average wellhead parameters of global fields after Lee (2001), Bettagli & Bidini (1996), Etemoğlu & Can (2007), Reykjavik Energy (2007) and Barbacki (2012) – modified

zwykle warunki punktu potrójnego wody (Lee, 2001). W punkcie potrójnym lód, woda i para występują w równowadze termodynamicznej, a parametry termodynamiczne mają następujące wartości: temperatura 0°C (ok. 273K), ciśnienie 0,006 bar, entalpia 0 kJ/kg.

Egzergia właściwa płynów termalnych może być rozumiana jako maksymalna praca możliwa do wykonania przez jednostkę masy płynu termalnego, a jej wartość odniesiona do punktu potrójnego obliczana jest za pomocą prostego wzoru:

$$e = h - 273s$$

gdzie: e – egzergia właściwa [kJ/kg], s – entropia właściwa [kJ/kgK].

Nie wdając się w szczegółowe rozważania termodynamiczne, można zauważyć, że egzergia uwzględnia również wartość entropii jako drugiego niezależnego parametru termodynamicznego, co warunkuje bardziej poprawną ocenę „zawartości energii” w płynie termalnym. Wartość egzergii stanowi zatem obiektywne kryterium klasyfikacji zasobów geotermalnych i – choć jej wartość zależy od przyjętych warunków odniesienia – jako taka powinna zastąpić obecnie stosowane kryteria odwołujące się do temperatury czy entalpii.

Na rycinie 1 na podstawie wartości entalpii nie można rozstrzygnąć, które złożo jest „lepsze” – Geysers czy Nesjavellir. Wartości egzergii przedstawione graficznie na rycinie 2 dowodzą, że z energetycznego punktu widzenia Nesjavellir prezentuje się korzystniej (egzergia zasobów ok. 1000 kJ/kg) niż Geysers (egzergia ok. 900 kJ/kg). Podobnie jak w przypadku tureckiego złoża Germencik. Jak wynika z ryciny 1, wykazuje ono korzystniejsze parametry energetyczne (temperatura, entalpia) niż złożo Nesjavellir, jednak ze względu na niższe ciśnienia (Nesjavellir – ok. 12 bar, Germencik – ok. 3 bar), Germencik posiada niższą egzergię zasobów wynoszącą ok. 920 kJ/kg (Barbacki, 2012).

Zgodnie z propozycją przedstawioną przez Lee (2001), wartość egzergii pary nasyconej w temperaturze 100°C i pod ciśnieniem 1 bar wynosząca 665 kJ/kg (ryc. 2) może stanowić racjonalną wartość graniczną, powyżej której zasoby byłyby kwalifikowane jako zasoby o wysokiej jakości (wysokiej egzergii). Przyjęcie takiej granicy wynika z faktu, że niskociśnieniowe pary o temperaturze 100°C są wykorzystywane do bezpośredniej generacji energii elektrycznej, np. na złożu Wairakei (Nowa Zelandia) przy użyciu konwencjonalnych turbin parowych. Tak więc wszystkie zasoby plasujące się powyżej izolinii 665 kJ/kg na rycinie 2 traktowane byłyby jako zasoby o wysokiej egzergii. Z kolei wartość egzergii wrzącej wody pod ciśnieniem 1 bar wynosząca ok. 61 kJ/kg (ryc. 2) mogłaby wyznaczać izolinię rozgraniczającą zasoby o średniej i niskiej jakości (egzergii).

Polskie zasoby geotermalne w większości należałyby do zasobów o niskiej jakości (egzergii) i jedynie na wspomnianym obszarze Polski centralnej mogłyby należeć do grupy złożo z średniej jakości z egzergią ok. 100 kJ/kg. Nie można również wykluczyć tutaj głębszych stref zbiornika podhalańskiego, gdzie występowanie złożo z średniej jakości

o egzergii powyżej 60 kJ/kg wydaje się całkiem realne (Bujakowski & Barbacki, 2004).

PODSUMOWANIE

1. Klasyfikacja zasobów geotermalnych na podstawie kryterium temperaturowego z odwoływaniem się do entalpii (np. 80°C – zasoby niskiej entalpii) jest uzasadniona jedynie lokalnie, w przypadku płynów występujących w postaci wód termalnych, gdzie entalpia jest liniową funkcją temperatury.

2. Wartości samej entalpii również nie stanowią obiektywnego wskaźnika klasyfikacji zasobów geotermalnych, szczególnie w przypadku występowania par i kondensatów. Racjonalnym kryterium energetycznej klasyfikacji zasobów jest wartość egzergii płynów termalnych. Istotną kwestię stanowi ustalenie punktu pomiaru parametrów termodynamicznych, tzn. czy określamy parametry energetyczne złożowe czy też występujące na głowicy otworów eksploatacyjnych. Na przedstawionych wykresach przyjęto uśrednione dane z poszczególnych złożo, rejestrowane na głowicach otworów (egzergię szacowano dla realnych uśrednionych warunków eksploatacji).

3. Exergia polskich złożo geotermalnych na tle znanych złożo światowych prezentuje się dość skromnie. Rozwój geotermii w naszym kraju będzie zatem ukierunkowany na wykorzystanie energii geotermalnej głównie w ciepłownictwie, natomiast potencjalna produkcja energii elektrycznej będzie przypuszczalnie miała znaczenie drugorzędne.

LITERATURA

- BARBACKI A. 2012 – Classification of geothermal resources in Poland by exergy analysis – comparative study. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 16: 123–128.
- BUJAKOWSKI W. & BARBACKI A. 2004 – Potential for geothermal development in Southern Poland. *Geothermics*, 33: 383–395.
- BENDERITTER Y. & CORMY G. 1990 – Possible approach to geothermal research and relative costs estimate. [W:] Dickson M.H. & Fanelli M. (red.) *Small geothermal resources*. UNITAR/UNDP, Rome: 61–71.
- BETTAGLI N. & BIDINI G. 1996 – Larderello-Farinello-Valle Secolo geothermal area: exergy analysis of the transportation network and of the electric power plants. *Geothermics*, 25: 3–16.
- ETEMOGLU A.B. & CAN M. 2007 – Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 11: 1596–1606.
- HAENEL R., RYBACH L. & STEGENA L. 1988 – Fundamentals of geothermics. [W:] Haenel R., Rybach L. & Stegena L. (red.) *Handbook of terrestrial heat flow-density determination*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht: 9–57.
- HOCHSTEIN M. 1990 – Classification and assessment of geothermal resources. [W:] Dickson M.H. & Fanelli M. (red.) *Small geothermal resources*. UNITAR/UNDP, Rome: 31–59.
- KESTIN J. 1980 – Available work in geothermal energy. [W:] Kestin J., DiPippo R., Khalifa H.E. & Ryley D.J. (red.) *Sourcebook on the production of electricity from geothermal energy*. U.S. Gov. Print. Office, Washington: 227–275.
- LEE K. 2001 – Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30: 431–442.
- MUFFLER P. & CATALDI R. 1978 – Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7: 53–89.
- Reykjavik Energy 2006** – Nesjavellir power plant. Orkuveita Reykjavíkur, Reykjavik.
- SZARGUT J. 1998 – *Termodynamika techniczna*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

Praca wpłynęła do redakcji 6.09.2011 r.
Po recenzji akceptowano do druku 20.01.2012 r.