

Elektrownie geotermalne oparte na systemach binarnych

Renata Polak, Dariusz Dziki, Andrzej Krzykowski, Stanisław Rudy, Renata Różyło¹

Katedra Techniki Ciepłej, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie,

¹Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin, e-mail: renata.polak@up.lublin.pl

Streszczenie. Energia geotermalna jest energią Ziemi zgromadzoną w wodzie, parze wodnej i suchych gorących skałach. Światowe zasoby geotermalne szacowane są na około $8 \cdot 10^{30}$ J. Energia geotermalna wykorzystywana jest w sposób bezpośredni i pośredni, który polega na jej konwersji na energię elektryczną. Wykorzystanie energii geotermalnej do generacji prądu ma miejsce w 24 krajach na świecie. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje elektrowni geotermalnych: parowe i binarne. Elektrownie binarne mogą być oparte na Obiegu Organicznym Rankine'a lub Cyklu Kalina. Obecnie na świecie działa 75 elektrowni geotermalnych opartych na systemach binarnych. W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat energii geotermalnej, sposobów jej wykorzystania, szczególnie do produkcji prądu elektrycznego w elektrowniach geotermalnych opartych na systemach binarnych.

Słowa kluczowe: energia geotermalna, systemy binarne, elektrownie geotermalne.

ZASOBY ENERGII GEOTERMALNEJ I ICH PODZIAŁ

Energia geotermalna jest częścią energii Ziemi nagromadzoną w wodzie, parze wodnej i suchych gorących skałach [18, 26]. Przy czym można wyróżnić energię pierwotną jako pozostałość procesów formowania się Ziemi oraz energię powstającą podczas rozpadu pierwiastków promieniotwórczych takich jak uran czy tor [4]. Szacuje się, że całkowite światowe zasoby energii geotermalnej wynoszą około $8 \cdot 10^{30}$ J [3]. Natomiast do głębokości 5000 m, Lewandowski ocenia zasoby energii geotermalnej na około $1,4 \cdot 10^{26}$ J [13]. Zasoby energii geotermalnej ze względu na sposób pozyskiwania dzieli się na hydrotermalne i petrotermalne [18]. Zasoby hydrotermalne stanowią wolne wody podziemne eksploatowane otworami produkcyjnymi. Zasoby petrotermalne to energia zakumulowana w suchych gorących skałach lub skałach wysadów solnych [25].

Biorąc pod uwagę temperaturę wód geotermalnych, zasoby geotermalne można podzielić na [19]:

- niskotemperaturowe, temperatura wody $< 90^{\circ}\text{C}$,
- średniotemperaturowe, temperatura wody od 90°C do 150°C ,
- wysokotemperaturowe, temperatura wody $> 150^{\circ}\text{C}$.

SPOSOBY WYKORZYSTANIA ENERGII GEOTERMALNEJ

Energia geotermalną wykorzystuje się w sposób bezpośredni lub pośredni [1, 11]. Bezpośrednie – oznacza wykorzystanie energii geotermalnej wprost a nie jej konwersję na inny rodzaj energii. Natomiast pośrednie wykorzystanie energii geotermalnej polega na jej konwersji na energię elektryczną [24]. Podstawowe rodzaje bezpośredniego wykorzystania energii geotermalnej to [14, 17]:

- ciepłownictwo,
- zastosowania w rolnictwie,
- zastosowania w hodowlach wodnych,
- pompy ciepła do chłodzenia i ogrzewania,
- zastosowania w przemyśle.

W rolnictwie energia geotermalna wykorzystywana jest do podgrzewania i nawadniania gleby, ogrzewania szklarni, upraw pod osłonami foliowymi oraz rozkładu biomasy [15]. Płyny geotermalne wykorzystywane są również do mycia i suszenia pomieszczeń gospodarskich a także w hodowlach ryb, grzybów i zwierząt [14].

Zastosowanie w przemyśle polega między innymi na wykorzystaniu do: suszenia (drewna, produktów rolniczych, mączki rybnej, ziemi okrzemkowej), fermentacji ścieków, wytwarzania wody pitnej poprzez destylację wody morskiej [16, 23] a także do topnienia śniegu i lodu na chodnikach i jezdni, podgrzewania pasów startowych lotnisk, do produkcji kosmetyków [11]. Największa ilość energii geotermalnej wykorzystywana jest do celów ciepłowniczych poprzez sieci

ciepłownicze. W tym przypadku energia geotermalna służy do ogrzewania i chłodzenia a także przygotowania ciepłej wody użytkowej [14].

Bezpośrednie wykorzystanie energii geotermalnej na świecie odbywa się w 78 krajach a w Europie w 37 krajach [12].

WYKORZYSTANIE ENERGII GEOTERMALNEJ DO PRODUKCJI PRĄDU ELEKTRYCZNEGO

Wykorzystanie energii geotermalnej do generacji prądu elektrycznego ma miejsce w 24 krajach na świecie [11]. W 2010 roku całkowita moc zainstalowana osiągnęła wartość 10716,7 MW_e a produkcja prądu elektrycznego wyniosła 67246,3 GWh [12]. Liderami w wykorzystaniu energii geotermalnej do produkcji prądu elektrycznego są: USA, Filipiny, Indonezja, Meksyk, Włochy, Japonia, Nowa Zelandia, Islandia [2, 11, 12]. Na terenie Europy działa obecnie 59 elektrowni geotermalnych w tym 47 w krajach Unii Europejskiej. Łączna moc zainstalowana wynosi około 1,6 GW_e co daje roczną produkcję energii na poziomie około 10,9 TWh. Na pierwszym miejscu znajdują się Włochy, gdzie wytwarza się 50% całkowitej produkcji energii elektrycznej w Europie [10].

Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje elektrowni geotermalnych: elektrownie parowe i elektrownie binarne [22]. W przypadku elektrowni parowych ze złoża geotermalnego wydobywana jest para nasycona sucha, która po przejściu przez filtr cząstek stałych i wilgoci kierowana jest do turbiny parowej, gdzie następuje zamiana energii cieplnej zawartej w parze na energię mechaniczną ruchu obrotowego łopatek wirnika a następnie w generatorze na prąd elektryczny. Po wykorzystaniu para wodna przechodzi do skraplacza (zwykle chłodni kominowej), skropliny otworem chłodnym powracają do złoża, co zapewnia jego odnawialność [9]. Na świecie istnieją dwa złoża geotermalne tego rodzaju: Larderello (Włochy) oraz The Geysers (California, USA). Mają one duże znaczenie historyczne i stanowią największe kompleksy elektrowni wykorzystujących pary wód geotermalnych na skalę przemysłową [5].

Początki wykorzystania pola geotermalnego Larderello do generacji prądu elektrycznego sięgają 1904 roku. Pierwszą komercyjną elektrownię „Larderello 1” oddano do użytku w 1913 roku. Obecnie eksploatowane pole geotermalne Larderello zajmuje powierzchnię około 250 km². Para nasycona sucha o temperaturze od 150°C do 270°C przy ciśnieniu 2-18 bar, wydobywana jest na powierzchni ziemi 200 otworami produkcyjnymi o głębokości od 500 do 3500 m. Pole Larderello eksploatowane jest obecnie przez 21 elektrowni o łącznej mocy zainstalowanej 594,5 MW_e, co stanowi około 10% całkowitej produkcji prądu elektrycznego przy wykorzystaniu energii geotermalnej na świecie [7].

Pierwszą elektrownię geotermalną na polu The Geysers uruchomiono w 1921 roku. Obecnie z tego pola geotermalnego o powierzchni 72 km² para nasycona sucha wydobywana jest przez ponad 400 otworów eksploatacyjnych o głębokości do 3200 m. Na polu The Geysers działa 21 elektrowni o łącznej mocy zainstalowanej 1584 MW_e [9].

Elektrownie binarne (dwuczynnikowe) stosuje się gdy ze złoża geotermalnego wydobywana jest woda silnie zmineralizowana, agresywna chemicznie, o temperaturze niższej (poniżej 150°C) niż w przypadku elektrowni z bezpośrednim odparowaniem wody geotermalnej [20, 27]. Sprawność cieplna elektrowni binarnych wynosi od 10 do 15% [18].

SYSTEMY BINARNE WYKORZYSTYWANE W GEOTERMII

Geotermalne elektrownie binarne to systemy wytwarzające energię elektryczną dzięki wykorzystaniu dwóch różnych płynów roboczych oddzielonych od siebie hydraulicznie – nie mieszających się [21].

Woda geotermalna pochodząca ze złoża geotermalnego jest płynem dostarczającym energię cieplną natomiast drugim płynem roboczym jest czynnik napędzający turbinę o znacznie niższej niż woda geotermalna temperaturze wrzenia.

W elektrowniach binarnych wyróżnia się trzy obiegi. Pierwszy z nich to obieg wody geotermalnej pobranej ze złoża, która oddaje energię cieplną przepływając przez wymiennik a następnie schłodzona zostaje zatłoczona do złoża geotermalnego. Istota działania drugiego obiegu polega na wykorzystaniu pozyskanego w wymienniku ciepła z geopłynu do odparowania niskowrzącego czynnika roboczego. Następnie pary czynnika są kierowane na turbinę i generator, gdzie odbywa się generacja prądu elektrycznego. Praca trzeciego obiegu polega na skropleniu par czynnika roboczego [27].

Procesami technologicznymi wykorzystywanymi do produkcji prądu elektrycznego w instalacjach binarnych są [6]:

- Obieg Organiczny Rankine’a (ORC),
- Cykl Kalina.

W przypadku instalacji ORC jako drugi płyn roboczy stosuje się czynniki organiczne, natomiast w przypadku instalacji bazujących na Cyklu Kalina mieszaninę amoniak-woda. Cykl pracy elektrowni geotermalnej opartej na systemie binarnym ORC można przedstawić następująco [5]:

- pobranie otworem produkcyjnym z użyciem pompy, wody geotermalnej i skierowanie jej poprzez filtr do parownika stanowiącego wymiennik ciepła,
- w parowniku woda geotermalna oddaje ciepło czynnikowi roboczemu,
- woda geotermalna zostaje zatłoczona otworem chłodnym do złoża,
- czynnik roboczy po odparowaniu przemieszczany jest w postaci pary do turbogeneratora produkującego prąd elektryczny,
- następnie czynnik roboczy kierowany jest do kondensatora gdzie ulega skropleniu (proces skropleniu możliwy jest dzięki wykorzystaniu chłodni kominowej).

System binarny ORC jest bardziej rozpowszechniony na świecie, obecnie ponad 70 elektrowni geotermalnych wykorzystuje tę technologię do generacji prądu [8, 21].

Cykl Kalina został wynaleziony i opatentowany w latach 70-tych XX wieku przez Alexandra Kalina. W tym

systemie binarnym jako czynnik roboczy wykorzystuje się mieszaninę amoniak-woda, odparowującą w temperaturze około 100°C. Temperatura parowania jest zmienna i zależy od stosunku zawartości amoniaku do wody, mającego indywidualny charakter dla każdej elektrowni binarnej (zwykle 70% amoniaku, 30% wody). Zastosowanie mieszaniny amoniak-woda, ewaporującej i kondensującej w zmiennym przedziale temperatur, zwiększa sprawność odbioru energii w niej zawartej, wpływając na wzrost efektywności całego obiegu.

Pracę elektrowni binarnej opartej na cyklu Kalina można opisać w następujący sposób [5, 6]:

- pobranie wody geotermalnej otworem produkcyjnym i skierowanie jej do parownika, w którym oddaje ciepło mieszaninie amoniak-woda,
- załoczenie wody geotermalnej do warstwy wodonośnej,
- skierowanie mieszaniny amoniak-woda do separatora, gdzie ulega rozdzielaniu na tzw. mocną i słabą solankę,
- solanka mocna kierowana jest na turbinę napędzającą generator,
- solanka słaba kierowana jest do wymiennika ciepła, gdzie oddaje ciepło,
- skierowanie strumienia par i wód do skraplacza, gdzie ulegają kondensacji,
- skierowanie mieszaniny do rekuperatora, gdzie następuje odzysk niewykorzystanego w pełni ciepła,
- skierowanie mieszaniny do wymiennika ciepła a następnie do parownika co zamyka cykl.

Podstawowa różnica między systemami binarnymi ORC i Kalina polega na zastosowaniu odmiennych procesów generujących siłę napędową do wytwarzania energii elektrycznej [21]. Szacuje się, że sprawność cyklu Kalina jest wyższa od sprawności obiegu ORC o około 25%. Cykl Kalina zawiera ponad to wewnętrzny system odzysku ciepła (rekuperator), co zwiększa efektywność termodynamiczną w stosunku do elektrowni binarnych ORC [5].

Spośród 75 działających obecnie na świecie elektrowni geotermalnych opartych na systemach binarnych tylko trzy wykorzystują Cykl Kalina. Należą do nich instalacje w Husaviku na Islandii oraz dwie zlokalizowane w Niemczech – Unterhaching i Bruchsal [8]. Monopol na wdrażanie technologii Kalina posiada amerykańska firma Energy Inc., co może stanowić utrudnienie w jej upowszechnieniu, mimo wyższych sprawności energetycznych [21].

PRZEGLĄD ELEKTROWNII GEOTERMALNYCH OPARTYCH NA SYSTEMACH BINARNYCH

W 2006 roku została oddana do użytku elektrownia binarna w Chena Hot Springs w centralnej części Alaski (jest to obszar niepodłączony do sieci energetycznej). Elektrownia pracuje w systemie ORC, czynnikiem roboczym jest R-134a (tetrafluoroetan), który charakteryzuje się znacznie niższą temperaturą wrzenia niż woda. Temperatury wody geotermalnej czerpanej z głębokości 1000 m wynosi 74°C, jest to najniższa temperatura wody geotermalnej wykorzystywanej do produkcji prądu elektrycznego na świecie. Całkowita moc zainstalowana wynosi 400kW_e [6].

Kolejną instalacją binarną wykorzystującą do generacji prądu elektrycznego wody geotermalne o temperaturze niższej od 100°C jest elektrownia geotermalna w miejscowości Neustadt – Glewe w Niemczech. Elektrownię pracującą w systemie ORC uruchomiono w 2003 roku, czynnikiem roboczym jest węglowodór nasycony n-pentan. Temperatura wód geotermalnych o wydajności 110m³/h wynosi 98°C. Całkowita moc zainstalowana to 210 kW_e. Również w Austrii w Birdsville działa od 1992 roku elektrownia ORC wykorzystująca wody geotermalne o temperaturze 98°C, wydajności 97 m³/h, wydobywane z głębokości 1280 m. Całkowita moc zainstalowana wynosi 80 kW_e [6].

W 2001 roku w Husaviku na Islandii rozpoczęła pracę siłownia binarna oparta na Cyklu Kalina. Czynnikiem roboczym jest mieszanina wody i amoniaku, która osiąga w parowniku temperaturę 121°C. W instalacji wykorzystywana jest woda geotermalna o temperaturze 121°C i wydajności 90 m³/h. Uzyskana moc elektryczna wynosząca 1600 kW_e pochodzi częściowo z procesów spalania biogazu w silniku napędzającym generator prądu [6].

Kolejnym przykładem elektrowni binarnej pracującej w Cyklu Kalina jest oddana do użytku w 2007 roku siłownia w Unterhaching w Niemczech. Wykorzystuje ona wody geotermalne o wydajności 150 m³/h, temperaturze 115°C wydobywane z głębokości około 3500 m. Całkowita moc elektryczna wynosi 3,36 MW_e a moc cieplna 38 MW_t [6].

Od roku 2008 działa we Francji w miejscowości Soultz-Sous-Forest elektrownia ORC zrealizowana w ramach projektu HDR (Hot Dry Rock). Jako źródło energii cieplnej wykorzystywane są gorące granity zalegające na głębokości około 5000 m. Temperatura na dnie otworów geotermalnych wynosi około 200°C, natomiast temperatura wody po odebraniu ciepła od granitów, na powierzchni ziemi ma wartość około 185°C, przy wydajności około 300 m³/h. Czynnikiem roboczym jest izobutan, zainstalowana moc cieplna wynosi 50 MW_t a elektryczna 2,2 MW_e [6].

Ponad połowa elektrowni ORC działa w USA, które są liderem w dziedzinie produkcji prądu elektrycznego przy wykorzystaniu energii geotermalnej. Całkowita zainstalowana moc w USA wynosi 3093 MW_e, a produkcja ponad 16 603 GWh/rok. Udział elektrowni ORC w tej strukturze charakteryzuje się na poziomie 590 MW_e mocy zainstalowanej [8].

PODSUMOWANIE

Pośrednim sposobem wykorzystania energii geotermalnej jest jej konwersja na energię elektryczną. Elektrownie geotermalne działają w 24 krajach na świecie. W 75 elektrowniach produkcja prądu elektrycznego oparta jest na systemach binarnych: Obiegu Organicznym Rankine'a (ORC) lub Cyklu Kalina. Zastosowanie systemów binarnych pozwoliło na wykorzystanie do generacji prądu elektrycznego złóż geotermalnych o temperaturze poniżej 100°C. Na świecie działają tylko trzy elektrownie binarne oparte na Cyklu Kalina. Ponad połowa elektrowni ORC znajduje się na terenie USA.

LITERATURA

1. **Fridleifsson Ingvar B. 2009.** Energia geotermalna na świecie i jej potencjalna rola w łagodzeniu zmian klimatycznych. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój. 1, 3-13.
2. **Gładysz M. 2008.** Elektrownie geotermalne na świecie. GLOBEnergia 2, 14-17.
3. **Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M., Piechota G. 2010.** Technologie geoenergetyczne. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2010.
4. **Kaczmarczyk M. 2009a.** Podstawy geotermii. GLOBEnergia 2, 13-15.
5. **Kaczmarczyk M. 2009b.** Systemy binarne w geotermii. GLOBEnergia 4, 10-13.
6. **Kaczmarczyk M. 2010a** Produkcja prądu elektrycznego. Zastosowanie systemów binarnych w geotermii – przykłady. GLOBEnergia 2, 35-37.
7. **Kaczmarczyk M. 2010b.** Larderello geotermalna tradycja Włoch. GLOBEnergia 3, 50-51.
8. **Kaczmarczyk M. 2011a.** Wykorzystanie energii geotermalnej do produkcji prądu elektrycznego zastosowaniem Obiegu Organicznego Rankine'a lub cyklu Kaliny – przegląd instalacji działających na świecie. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój. 1-2, Kraków 2011, 131-145.
9. **Kaczmarczyk M. 2011b.** Gorąca kalifornia. GLOBEnergia 1, 44-45.
10. **Kaczmarczyk M. 2012.** Energia elektryczna z geotermii. Analiza stanu obecnego i perspektywy dla Europy. GLOBEnergia 3, 20-21.
11. **Kępińska B. 2007.** Energia geotermalna – wykorzystanie na świecie i w Europie. GLOBEnergia 1, 14-17.
12. **Kępińska B. 2011.** Energia geotermalna na świecie – stan wykorzystania, perspektywy rozwoju. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój. 1-2, 27-37.
13. **Lewandowski W.M. 2007.** Proekologiczne odnawialne źródła energii. WNT, Warszawa 2007.
14. **Lund J.W. 2000.** Sposoby bezpośredniego wykorzystania energii geotermalnej. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia. 4, Kraków 2000.
15. **Lund J.W. 2004a.** Bezpośrednie zastosowanie ciepła geotermalnego. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia. 4, 3-19.
16. **Lund J.W. 2004b.** Bezpośrednie wykorzystanie energii geotermalnej. Międzynarodowe Dni Geotermalne. Polska 2004, Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2004, 33-50.
17. **Mokrzycki E. 2005.** Podstawy gospodarki surowcami energetycznymi. RGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.
18. **Nowak W., Sobański R., Kabat M. 2000.** Systemy pozyskiwania i wykorzystania energii geotermicznej. Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000.
19. **Nowak W., Stachel A., Borsukiewicz-Gozdur A. 2008.** Zastosowania odnawialnych źródeł energii. Wydawnictwo uczelniane Politechniki Szczecińskiej.
20. **Pająk L. 2012.** Adaptacja technologii wykorzystywanych w geotermii dla potrzeb energetyki zawodowej. III Konferencja Wytwórców Energii Elektrycznej i Ciepłej, Skawina 2012, 45-55.
21. **Pająk L., Bujakowski W. 2013.** Energia geotermalna w systemach binarnych. Przegląd geologiczny. Vol 6, 11/2, 699-705.
22. **Pawlik M., Strzelczyk F. 2009.** Elektrownie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009.
23. **Pawlikowski M. 2010.** Drinking water production Rusing of geothermal water energy. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój. 1-2, 87- 90.
24. **Polak R., Dziki D., Krzykowski A., Rudy S., Serwatka Z., Tomilo J. 2013.** Acquisition and economic use of geothermal energy. Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, vol.13, no. 1, 133-138.
25. **Smętkiewicz K. 2010.** Geotermia petrotermalna. GLOBEnergia 1, 30-33.
26. **Sobański R., Kabat M., Nowak W. 2010.** Jak pozyskać ciepło z Ziemi?, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa.
27. **Zimny J., 2010.** Elektrownie geotermalne. Szansa rozwoju energetyki Europy i Polski. Energetyka Ciepła i Zawodowa, 4, 35-38.

GEOTHERMAL POWER PLANTS BASED
ON THE BINARY SYSTEMS

Summary. Geothermal energy is the Earth's energy accumulated in water, steam and hot dry rocks. The total world resources of geothermal energy are estimated at about $8 \cdot 10^{30}$ J. Geothermal energy is used in direct and indirect way which depends on their conversion into electricity. The use of geothermal energy for electricity generation takes place in 24 countries around the world. There are two basic types of geothermal power plants: steam and binary. The binary power plants can be based on the Organic Rankine cycle or Kalina cycle. There are currently about 75 geothermal power plants based on binary systems. This paper includes the basic information concerning the geothermal energy, and the ways how to use it. Especially the geothermal power plants based on binary systems are presented.

Key words: geothermal energy, binary systems, geothermal power plants.