Bartłomiej TOMCZYK
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2016

ANALIZA MOŻLIWOŚCI TECHNICZNYCH WYKORZYSTANIA ENERGII WÓD GEOTERMALNYCH DO PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ DLA OTWORU BAŃSKA PGP-3

STRESZCZENIE

Analiza możliwości wykorzystania energii wód geotermalnych do produkcji energii elektrycznej została wykonana dla otworu Bańska PGP-3. Charakterystyka układów opartych na organicznym cyklu Rankine'a (ORC) oraz cyklu Kaliny. Koncepcja wykorzystania silnika Stirlinga oraz ogniw termoelektrycznych. Dla układów działających zgodnie z ORC i cyklem Kaliny – analiza potencjalnych sprawności układów, w zależności od parametrów chłodzenia – na podstawie doświadczeń z innych instalacji przemysłowych i badawczych. Dla pozostałych – analiza sprawności oparta na wzorach matematycznych. Wyniki – sprawności od 3% dla układów opartych na termoparach, 5% dla ogniw Peltiera, 7% dla ORC, 9% dla cyklu Kaliny, do 11,6% dla silników Stirlinga. Zestawienie rocznych teoretycznych produkcji energii elektrycznej – przy założeniu schłodzenia wód geotermalnych o 10 K. Wyniki – produkcja roczna na poziomie 0,9 GWh dla instalacji opartych na termoparach, 1,3 GWh dla ogniw Peltiera, 1,8 GWh dla ORC, 2,3 GWh dla cyklu Kaliny oraz 2,6 GWh dla układów opartych na silnikach Stirlinga.

SŁOWA KLUCZOWE

Energia geotermalna, energia elektryczna, ORC, cykl Kaliny, silnik Stirlinga, ogniwa termoelektryczne

* * *

WPROWADZENIE

Złoża geotermalne pod względem temperaturowym podzielone zostały na wysokotemperaturowe i niskotemperaturowe. Bezpośrednio z tego podziału wynikają rozwiązania technologiczne w siłowniach geotermalnych.

W przypadku złóż wysokotemperaturowych para lub woda geotermalna może być czynnikiem roboczym elektrowni. Jeżeli pozyskuje się parę suchą, może ona trafić bezpośrednio

do systemu, w przypadku pary mokrej lub cieczy przegrzanej – wcześniej należałoby poddać ją procesowi separacji (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014).

W przypadku źródeł niskotemperaturowych nie ma możliwości wykorzystania wód geotermalnych w obiegu elektrowni. Produkcja energii elektrycznej opiera się w tym przypadku na układach binarnych, w których czynnikiem roboczym jest medium niskowrzące, nie mieszające się z wodą z otworu geotermalnego (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014). Produkcja energii realizowana jest w ten sposób w systemach funkcjonujących na bazie organicznego cyklu Rankine'a oraz cyklu Kaliny.

To właśnie systemy binarne mogą być kolejnym sposobem wykorzystania zasobów geotermalnych Polski. Najbardziej korzystnymi do tego celu wydają się być wody na Podhalu – o temperaturach sięgających 86°C i wydajności do 550 m^3/h oraz obszary okolic Koła, Turku, Żnina i Stargardu Szczecińskiego (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014).

Niniejsze opracowanie ma na celu scharakteryzowanie możliwych rozwiązań technicznych systemów produkcji energii elektrycznej z wód geotermalnych dla otworu Bańska PGP-3. Pod uwagę zostały wzięte nie tylko cykl ORC i Kaliny, ale również koncepcje wykorzystania silnika Stirlinga i ogniw termoelektrycznych. Głównym elementem charakterystyki jest wyznaczenie z jak największym prawdopodobieństwem sprawności instalacji, opierając się nie tylko na wzorach teoretycznych, ale przede wszystkim na doświadczeniach z innych, funkcjonujących siłowni. Ponadto zostały obliczone teoretyczne wartości uzysku energii z układu.

1. GÓRNE ŹRÓDŁO

Źródłem energii cieplnej dla teoretycznej instalacji jest otwór geotermalny Bańska PGP-3, w miejscowości Bańska Niżna (rys. 1). Jest to otwór kierunkowy, o głębokości TVD (rzeczywistej głębokości pionowej – od dna otworu do wylotu na powierzchni) 3400 m i długości MD (długości odwiertu) 3519 m (dane Biuletynu Informacji Publicznej). Wiercenie otworu zakończono w kwietniu 2013. Zatwierdzona wydajność wypływu wód geotermalnych to 290 m^3/h, a ich temperatura wynosi 85°C (Ślimak i in. 2014). Ujęcia wód geotermalnych pochodzą z utworów mezozoicznych (wapień, dolomit) oraz eoceńskich (dane Biuletynu Informacji Publicznej).

Założono, że woda z otworu będzie zasilać siłownię geotermalną w sposób pośredni poprzez wymiennik ciepła. Osobnym problemem jest zagospodarowanie wody schłodzonej przez układ elektrowni. W istniejących obecnie systemach ciepłowniczych korzysta się z możliwości zatłaczania jej otworem z powrotem do złoża, problematyczna jest jednak kwestia traktowania schłodzonej wody jako ścieku, a co za tym idzie proces ten można uznać za zanieczyszczanie złoża. Dobrym rozwiązaniem byłoby tutaj wykorzystanie wody do zasilania np. instalacji grzewczych lub ciepłej wody użytkowej, celem jej dalszego wychłodzenia i następnie po procesie uzdatnienia zrzut do cieków powierzchniowych.

Rys. 1. Lokalizacja otworu Bańska PGP-3

Fig. 1. Location of the Banska PGP-3 borehole

2. DOLNE ŹRÓDŁO

Istotnym czynnikiem kształtującym efektywność procesu przetwarzania ciepła na energię elektryczną jest temperatura i rodzaj medium chłodzącego układ.

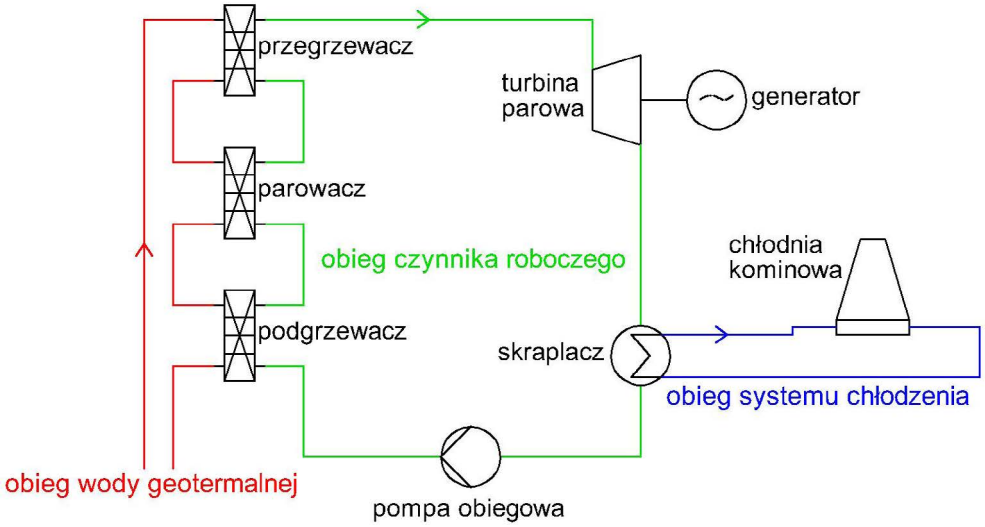
Odebrane w skraplaczu ciepło trafia za pomocą czynnika pośredniego do odbiornika ciepła. Im niższa temperatura i wyższe ciepło właściwe tego ośrodka, tym wyższa będzie sprawność układu generacji energii elektrycznej. Rolę odbiornika pełnią zwykle wody z cieków powierzchniowych w pobliżu instalacji lub powietrze atmosferyczne.

Wody powierzchniowe w stosunku do powietrza atmosferycznego mają przewagę, gdyż ich temperatura w ciągu roku ulega mniejszym zmianom, co jest bardzo korzystne dla stabilności pracy siłowni. Ponadto woda charakteryzuje się dużo wyższą pojemnością cieplną, co w efekcie powoduje, że jednostka wody jest w stanie przyjąć i przetransportować dużo większą ilość energii niż jednostka powietrza. Woda ponadto cechuje się wyższym współczynnikiem przejmowania ciepła niż powietrze. W związku z tym instalacja chłodzenia w przypadku wykorzystania wód powierzchniowych będzie mieć mniejsze gabaryty.

3. OPIS TECHNOLOGII

3.1. Organiczny cykl Rankine'a (ORC)

Zasada działania niskotemperaturowego układu ORC (rys. 2) jest bardzo zbliżona do pracy standardowej elektrowni pracującej według obiegu Rankine'a. W klasycznej siłowni zachodzi czterostopniowy proces konwersji energii. Podczas spalania paliwa w kotle dochodzi do konwersji jego energii chemicznej na energię cieplną zawartą w spalinach. Energia spalin w wymienniku ciepła zamieniana jest na energię pary wodnej. Para wędruje do turbiny parowej, tam oddaje swoją energię, która po przetworzeniu w energię mechaniczną napędza generator, produkujący energię elektryczną (Paska 2005).



Rys. 2. Schemat instalacji elektrowni realizującej obieg ORC w wariancie z przegrzewaczem, parowaczem i podgrzewaczem

Fig. 2. Scheme of installation in power station based on the ORC system – variant with heater, evaporator and superheater

Schemat działania siłowni ORC różni się od klasycznego ze względu na wykorzystywany czynnik roboczy pochodzenia organicznego. Z racji niskich temperatur źródła energii, są w nim stosowane płyny, które w przedziale ciśnień roboczych elektrowni charakteryzują się temperaturą wrzenia niższą niż woda (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014). Nośnikiem energii jest tutaj woda z otworu geotermalnego, która w wymienniku ciepła (parowaczu) lub systemie wymienników (podgrzewacz, parowacz, rzadziej przegrzewacz) oddaje energię cieplną, odparowując niskowrzący czynnik roboczy. Otrzymana w ten sposób para czynnika trafia na turbinę, gdzie jest rozprężana i wychładzana poprzez wykonanie pracy, która napędza generator energii elektrycznej. W skraplaczu czynnik zostaje schłodzony i jako ciecz

jest przetłaczany z powrotem do systemu wymienników ciepła (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014).

Jednym z ważniejszych problemów przy zastosowaniu obiegu ORC jest dobór czynnika roboczego, co pozwala na zoptymalizowanie efektywności konwersji energii.

Czynniki organiczne obiegu ORC można podzielić na trzy grupy: mokre, suche oraz izentropowe. Podział ten zależy od nachylenia krzywej nasycenia pary czynnika na wykresie T-S (Papierowska i in. 2013). Problemem jest znalezienie medium o optymalnych parametrach, tj. niska temperatura krytyczna oraz ciśnienie krytyczne, jak najmniejsze wartości lepkości oraz napięcia powierzchniowego, a także duża przewodność oraz pojemność cieplna, jak najwyższa wartość ciepła przemiany fazowej, stabilność termiczna, odporność na korozję, mała toksyczność (niska wartość wskaźników ODP – potencjału niszczenia warstwy ozonowej i GWP – potencjału tworzenia efektu cieplarnianego). Ponadto czynnik powinien być oczywiście możliwie jak najtańszy i jak najmniej agresywny w stosunku do elementów instalacji siłowni ORC. Za najlepsze dla tego typu siłowni czynniki robocze obecnie uznaje się czynniki chłodnicze, które oznaczane są kodem liczbowym poprzedzonym literą R (tab. 1) (Papierowska i in. 2013).

Tabela 1

Zestawienie wybranych czynników roboczych realizujących obieg ORC (Nouman 2012; Nowak i in. 2011)

Table 1

Parameters of working fluids, which are capable of working in the ORC system

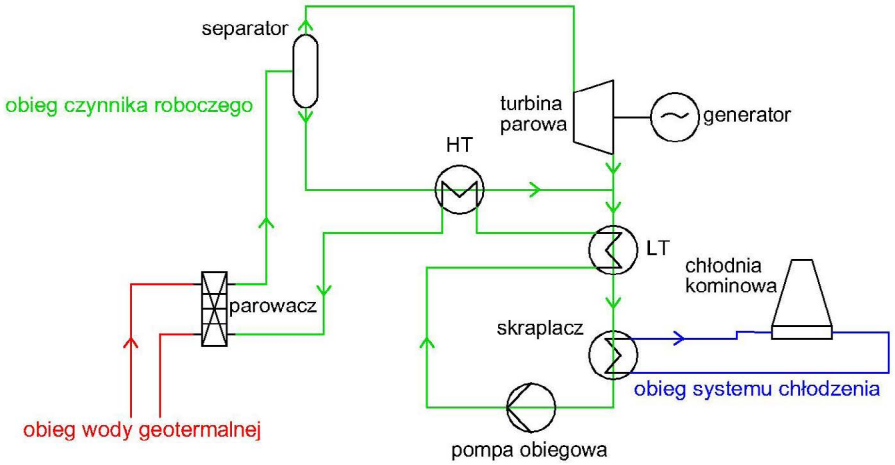
Nazwa czynnika	Temperatura krytyczna [°C]	Ciśnienie krytyczne [MPa]	Zakres ciśnień roboczych [MPa] (temp. 40–100°C)
propylen	92,4	45,6	1,652–4,467 (dla 90°C)
R227ea	102,8	29,3	0,703–2,833
butan	151,9	38	0,379–1,526
R245fa	154,01	36,51	0,250–1,265
R245ca	174,42	39,25	0,173–0,928
R113	214,06	33,92	0,078–0,437
cykloheksan	280,5	40,75	0,025–0,174
benzen	288,9	49,063	0,024–0,180
toluen	318,6	41,263	0,008–0,074

W teoretycznym obiegu proces przemian dla czynnika roboczego rozpoczyna się w turbinie, gdzie nasycona lub przegrzana para czynnika roboczego jest rozprężana izentropowo. Następnie para, przy stałym ciśnieniu, jest schładzana w skraplaczu oraz w efekcie skroplona. Pompa obiegowa, przy zachowaniu stałej entropii, przetłacza czynnik roboczy z obszaru izobary dolnej do izobary górnej. Po trafieniu do wymiennika ciepła czynnik zostaje izobarycznie ogrzany do temperatury parowania i odparowany, a w wariancie z przegrzaniem

pary, przegrzewany. Przegrzanie pary nie jest wymagane, ale poprawia warunki pracy turbiny, wykluczając możliwość wykroplenia się pary czynnika roboczego (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014).

3.2. Cykl Kaliny

Obieg Kaliny, podobnie jak obieg ORC, może występować w różnych konfiguracjach. W opisywanym przypadku (rys. 3) woda z odwiertu geotermalnego w parowaczu oddaje energię cieplną, która zostaje wykorzystana do ogrzania i odparowania niskowrzącego czynnika roboczego, którym w obiegu Kaliny jest odpowiednio dobrana mieszanina amoniaku z wodą ($NH_3 \cdot H_2O$). Następnie czynnik trafia do separatora, gdzie pary mieszaniny są oddzielane od fazy ciekłej. W kolejnym etapie do sprężonej z generatorem turbiny parowej trafia para o zawartości 95% amoniaku, która wykonując pracę, powoduje generację energii elektrycznej. Odseparowana faza ciekła przepływa natomiast do wysokociśnieniowego regeneratora (HT), a następnie zostaje zmieszana z parą opuszczającą turbinę. Całość trafia do regeneratora niskociśnieniowego (LT), gdzie obniżana jest temperatura mieszaniny, a następnie do skraplacza. Kondensat jest podgrzewany, najpierw w regeneratorze niskociśnieniowym, następnie wysokociśnieniowym i zostaje skierowany z powrotem do wymiennika ciepła.



Rys. 3. Schemat instalacji elektrowni realizującej cykl Kaliny

Fig. 3. Scheme of installation based on the Kalina cycle

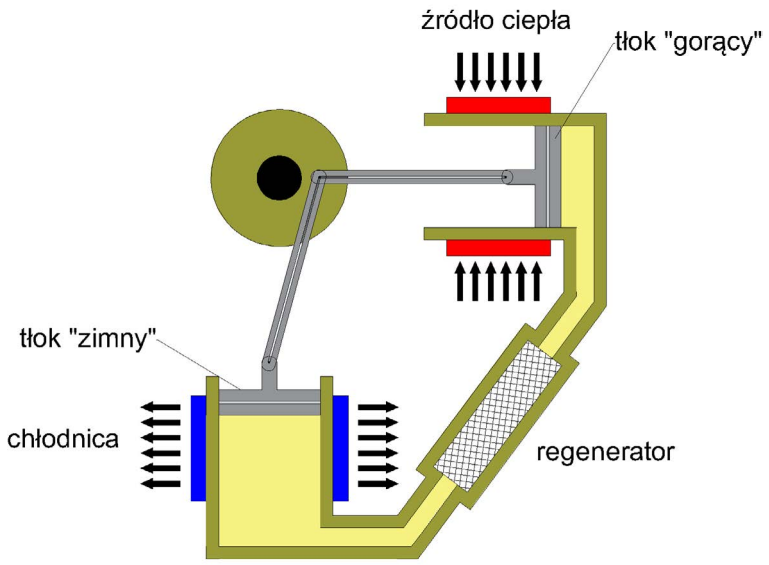
Teoretycznie sprawność obiegu Kaliny szacuje się na 20–50% wyższą niż standardowej siłowni ORC (Elsayed 2013; Mazurek i in. 2011). Jest to efektem stopniowego podnoszenia temperatury kondensatu, a co za tym idzie uzyskania mniejszej różnicy temperatur między wodą ze źródła ciepła a czynnikiem obiegowym elektrowni. Proces ten realizuje się w prze-

biegu przeciwprądowym, a wykorzystując zmienność rozpuszczalności amoniaku w wodzie wraz z temperaturą, dodatkowo doprowadza do stopniowego uwalniania coraz większej ilości amoniaku z roztworu wodnego.

3.3. Silnik Stirlinga

Innym sposobem wykorzystania energii geotermalnej do produkcji energii elektrycznej może być wykorzystanie silnika tłokowego ze spalaniem zewnętrznym. W tego typu konstrukcjach energia cieplna dostarczana jest do układu ze źródła zewnętrznego, nie jest więc istotne czy będzie nim proces spalania paliwa, energia słoneczna, czy energia geotermalna. Przykładem takiego układu może być wykorzystanie silnika Stirlinga.

Silnik Stirlinga typu alfa (rys. 4) to urządzenie składające się z dwóch tłoków umieszczonych w jednym cylindrze. Tłok „gorący" znajduje się po stronie źródła ciepła, tłok „zimny" po stronie chłodnicy, której rolę może pełnić zwykły radiator lub bardziej rozbudowany system np. z odzyskiem ciepła (Paska 2010). Pomiędzy tłokami znajduje się regenerator, pełniący funkcję bufora ciepła. Regeneratorem może być dowolny porowaty materiał o odpowiedniej masie, pojemności i przewodności cieplnej, którego parametry gwarantują utrzymanie gradientu temperatur pomiędzy jego rozgrzaną a zimną stroną. Porowata struktura materiału umożliwia migrację gazu przez ośrodek w dowolnym kierunku. Przestrzeń pomiędzy tłokami jest szczelnie zamknięta i wypełniona gazem (azot, wodór, hel), którego zadaniem jest transport ciepła (Paska 2010).



Rys. 4. Silnik Stirlinga typu alfa (na podstawie www.ohio.edu)

Fig. 4. Stirling engine – alpha type (based on www.ohio.edu)

Silnik Stirlinga pracuje więc korzystając z różnicy temperatur pomiędzy źródłem ciepła a chłodnicą. Po rozpoczęciu dostarczania ciepła dochodzi do rozgrzania gazu, który w procesie izotermicznego rozprężania przesuwa tłok gorący. Gaz ulega rozprężeniu, a oba tłoki przesuwają się w kierunku chłodnicy. Po przepłynięciu przez regenerator gaz oddaje ciepło do chłodnicy – następuje izochoryczne rozprężenie gazu. Następnie tłok zimny przesuwa się w kierunku źródła ciepła, izotermicznie sprężając gaz. Tłoki przemieszczają się w kierunku źródła ciepła, gdzie gaz przepływając przez regenerator zaczyna pobierać ciepło – cykl zostaje zamknięty.

Tłoki połączone są za pomocą korbowodu, do którego można dołączyć urządzenie zewnętrzne. Może być to generator, który będzie wytwarzał energię elektryczną.

3.4. Ogniwo termoelektryczne – termopara i ogniwo Peltiera

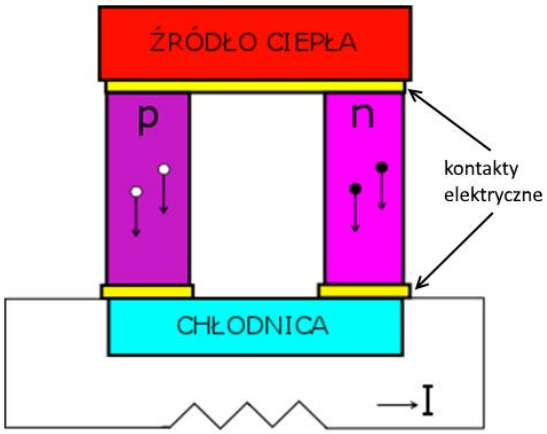
Koncepcja wykorzystania materiałów termoelektrycznych do generacji prądu elektrycznego związana jest z zachodzącym w tego typu ogniwach zjawiskiem Seebecka (Królicka i in. 2007). Zjawisko to dotyczy generacji napięcia w układzie złożonym z dwóch spojonych końcami metali lub półprzewodników. Proces zachodzi, gdy połączone ze sobą końcówki zostaną umieszczone w ośrodkach o różnych temperaturach.

Przykładem najprostszego urządzenia opartego na takiej konstrukcji jest termopara, bardziej złożonego – ogniwo Peltiera. W ogólnym ujęciu wartość powstałej siły elektromotorycznej w danym urządzeniu będzie zależeć od różnicy temperatur pomiędzy złączami ogniwa. Wartość ta nie będzie zależna od kształtu i wymiarów złącza układu.

Siła elektromotoryczna – dla ogniw termoelektrycznych określana mianem siły termoelektrycznej – składa się z dwóch składowych pochodzących z różnych zjawisk. Ich intensywność zależy od rodzaju materiału, z którego składa się ogniwo.

Ogniwo termoelektryczne metalowe (np. termopara) składa się z dwóch rodzajów metalu – materiału typu *n* (z nadmiarem elektronów) oraz typu *p* (z niedomiarem elektronów – dziurami elektronowymi) (rys. 5.). Wartość siły termoelektrycznej dla pojedynczej termopary można wyznaczyć jako iloczyn różnicy współczynnika Seebecka wykorzystanych metali oraz różnicy temperatur pomiędzy złączami ogniwa (Królicka i in. 2007). Siła wygenerowana przez jedną termoparę zwykle jest niewielka, więc do rozwiązań mających na celu produkcję energii elektrycznej stosuje się tzw. stosy termoelektryczne. Są one systemem termopar z szeregowym połączeniem elektrycznym oraz równoległym termicznym. Powoduje to zwielokrotnienie ilości złącz oraz siły termoelektrycznej.

Funkcjonowanie ogniwa Peltiera opiera się natomiast na zjawisku odwrotnym do zjawiska Seebecka. Zbudowane jest z dwóch równoległych płytek ceramicznych i ułożonych pomiędzy nimi przemiennie półprzewodników typu *n* i typu *p*. Zostały one połączone szeregowo, jeśli chodzi o układ elektryczny i równolegle pod względem termicznym. Przepływ energii elektrycznej przez ogniwo powoduje odbiór ciepła przez jedno ze złącz i wydzielenie go na drugim. Ilość przetransportowanej energii cieplnej wyznaczana jest jako iloczyn sumy współczynników Peltiera danych półprzewodników i natężenia prądu. Biorąc pod uwagę



Rys. 5. Schemat złącza p-n (na podstawie Królicka i in. 2007)

Fig. 5. P-n junction scheme (based on Królicka i in. 2007)

fakt, że zarówno zjawisko Seebecka jak i Peltiera są odwracalne (Królicka i in. 2007), można wnioskować, że ogniwo Peltiera może posłużyć do generacji prądu elektrycznego.

W momencie przyłożenia do złącz różnych wartości temperatur w materiale typu *n* zachodzi dyfuzja elektronów. W materiale typu *p* w tym samym czasie zaczynają dyfundować dziury elektronowe. Przemieszczają się one wzdłuż materiału, dążąc do wyrównania temperatur. Aby zapobiec procesowi migracji nośników – generowane jest pole elektryczne, którego cechą jest napięcie, będące pierwszą składową siły termoelektrycznej w ogniwie (Królicka i in. 2007).

Druga składowa jest generowana poprzez dryf fononów (kwantów energii drgań sieci krystalicznej) zgodny z gradientem temperatury. Dryfujące fonony zderzają się z nośnikami ładunków, częściowo przekazując im energię kinetyczną. Pobudzone elektrony lub dziury przemieszczają się do złącz po stronie niskiej temperatury – generując różnicę potencjałów, drugą składową siły elektromotorycznej (Królicka i in. 2007).

Współczynnik Seebecka dla metali to zwykle wartość rzędu kilku–kilkunastu μV/K. Wskaźnik ten jest dużo wyższy dla półprzewodników (Królicka i in. 2007). Ogniwo Peltiera może być więc źródłem energii elektrycznej lepszym niż termopara.

4. ANALIZA TECHNICZNA MOŻLIWOŚCI GENERACJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

4.1. Doprowadzona moc cieplna

Wspólnym mianownikiem dla wszystkich analizowanych instalacji jest wartość mocy cieplnej oddanej przez źródło energii – wodę geotermalną. Korzystając z poniższych wzorów (Bujakowski i Tomaszewska (red.) 2014) wyznaczono wartość mocy wartości schłodzenia 10 K.

$$\dot{Q}_z = \dot{m}_g \cdot c_g \cdot \Delta T$$

$$\dot{m}_g = \frac{1}{3600} \cdot \rho_g \cdot \dot{V}_g$$

gdzie:

$\dot{Q}_z$ – moc cieplna pozyskiwana z otworu [kW],
$\dot{m}_g$ – strumień masy wody geotermalnej [kg/s],
c_g – ciepło właściwe wody geotermalnej – przyjęto 4,2015 [kJ/kg·K],
ΔT – schłodzenie [K],
ρ_g – gęstość wody geotermalnej – przyjęto 968,55 [kg/m^3],
$\dot{V}_g$ – strumień wody geotermalnej – przyjęto wydajność 290 [m^3/h].

4.2. Parametry chłodzenia

Wyznaczenie sprawności danej instalacji wymagało przyjęcia temperatury odbiornika ciepła. Dokonano analizy dla dwóch możliwości – chłodzenia powietrzem lub wodą z cieku wodnego (Biały Dunajec). Na podstawie danych meteorologicznych i informacji o temperaturze wody w rzece, w obliczeniach przyjęto odpowiednie wartości temperatur (tab. 2).

Tabela 2

Zestawienie przyjętych parametrów chłodzenia

Table 2

Cooling parameters

Sprawność	Temperatura [°C]
Chłodzenie powietrzem	
Minimalna	17
Maksymalna	–2
Chłodzenie wodą	
Minimalna	14
Maksymalna	6,5

4.3. Sprawność organicznego cyklu Rankine'a

Badania cieczy roboczych realizujących obieg ORC wykazały, że nie zachodzą w nich przemiany izotermiczne. Organiczny cykl Rankine'a znacząco więc różni się przebiegiem od modelowego cyklu Carnota (DiPippo 2007), a jego sprawność teoretyczną wyraża wzór:

$$\eta = \frac{T_z - T_0}{T_z + T_0}$$

gdzie:

η – sprawność układu ORC,
T_z – temperatura źródła ciepła – przyjęte 358,15 [K],
T_0 – temperatura chłodnicy – według tabeli 2.

Jednakże żaden układ nie spełnia założeń idealnego cyklu. Zostały przeprowadzone analizy sprawności relatywnej niskotemperaturowych systemów ORC – będącej stosunkiem ich sprawności rzeczywistej do sprawności teoretycznej – dla zakresu temperatur 100–150°C. Wynika z nich, że siłownie ORC średnio osiągają sprawność relatywną rzędu 58% (DiPippo 2007). Na potrzeby opracowania dokonano sprawdzenia prawidłowości tej tezy dla niższych wartości temperatur źródła ciepła (np. Neustadt-Glewe [Operational Experience Since 2004], Chena Hot Springs [Holdmann 2007]). Okazało się, że sprawności relatywne wykazują podobne wartości i zależność tę można wykorzystać dla wyznaczenia z dużym przybliżeniem sprawności analizowanego obiegu ORC.

$$\eta = 0,58 \cdot \frac{T_z - T_0}{T_z + T_0}$$

Pominięto wpływ czynnika roboczego na sprawność układu, gdyż w takim przedziale temperatur sprawności cyklu ORC krzywe sprawności dla różnych cieczy pokrywają się.

4.4. Sprawność cyklu Kaliny

Sprawność tego typu układu zależy od wielu czynników. Poza poziomem temperatur dolnego źródła oraz chłodzenia, wysoce znaczącą rolę odgrywają tutaj skład procentowy mieszanki oraz ciśnienia panujące na każdym etapie przemiany. Jednakże analiza literatury pozwala stwierdzić, że sprawność cyklu Kaliny jest o 20–50% większa niż sprawność cyklu ORC o porównywalnych parametrach (Elsayed 2013; Mazurek i in. 2011). Na potrzeby obliczeń przyjęto, że sprawność siłowni opartej na cyklu Kaliny będzie o 30% wyższa niż w obiegu ORC.

4.5. Sprawność silnika Stirlinga

Idealny silnik Stirlinga realizuje cykl Stirlinga, który jest bardzo zbliżony do modelowego cyklu Carnota. Podobnie jak w przykładzie systemów ORC – idealna instalacja nie istnieje, więc ponownie dokonano przyjęcia odpowiedniego współczynnika korekcyjnego. Opierając się na odnalezionych informacjach producenckich, że istnieją silniki będące w stanie uzyskać sprawność na poziomie 50% sprawności Carnota, korygując tę wartość o sprawność generatora (96%), przyjęto współczynnik 0,48:

$$\eta = 0,48 \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_z}\right)$$

gdzie:

T_z – temperatura źródła ciepła – przyjęte 358,15 [K],

T_0 – temperatura chłodnicy – według tabeli.

4.6. Sprawność ogniw termoelektrycznych

Sprawność ogniw termoelektrycznych zależy od trzech czynników – temperatury źródła ciepła i chłodnicy, a także od współczynnika dobroci termoelektrycznej ZT, który jest związany z przewodnością elektryczną i termiczną materiału (Królicka i in. 2007; Liu i in. 2014):

$$\eta = \frac{T_z - T_0}{T_z} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_0}{T_z}}$$

gdzie:

ZT – współczynnik dobroci termoelektrycznej,

T_z – temperatura źródła ciepła – przyjęte 358,15 [K],

T_0 – temperatura chłodnicy – według tabeli.

Współczynnik dobroci termoelektrycznej zależy od materiału, z którego wykonano ogniwo. Wartości ZT dla materiałów starszego typu wynosiły 0,5–0,8. Dla nowoczesnych materiałów natomiast wartości sięgają nawet 2 (Królicka i in. 2007; Liu i in. 2014). Dla termopary przyjęto wartość 0,8, natomiast dla ogniwa Peltiera przyjęto wartość 1,44 – charakterystyczną dla ogniw z popularnego tellurku bizmutu Bi_2Te_3 (Królicka i in. 2007; Liu i in. 2014).

4.7. Generacja energii elektrycznej

Znając sprawność układu i maksymalną moc pozyskiwaną z otworu geotermalnego dla danej wartości schłodzenia, wyznaczono minimalną i maksymalną moc generacyjną układów:

$$N_{el} = \eta \cdot \dot{Q}_z$$

gdzie:

N_{el} – moc elektryczna [kW],

η – sprawność układu,

$\dot{Q}_z$ – moc cieplna pozyskiwana z otworu [kW].

Ilość wygenerowanej energii elektrycznej obliczono jako iloczyn mocy układu i jego czasu pracy w ciągu roku, ustalonego na 8000 h (dane producenckie).

$$E_{gen} = N_{el} \cdot t$$

gdzie:

E_{gen} – energia elektryczna wygenerowana w systemie [kWh/rok],
N_{el} – moc elektryczna [kW],
t – czas pracy instalacji [h/rok].

5. WYNIKI OBLICZEŃ

5.1. Sprawność systemu

Tabela 3

Porównanie sprawności analizowanych instalacji

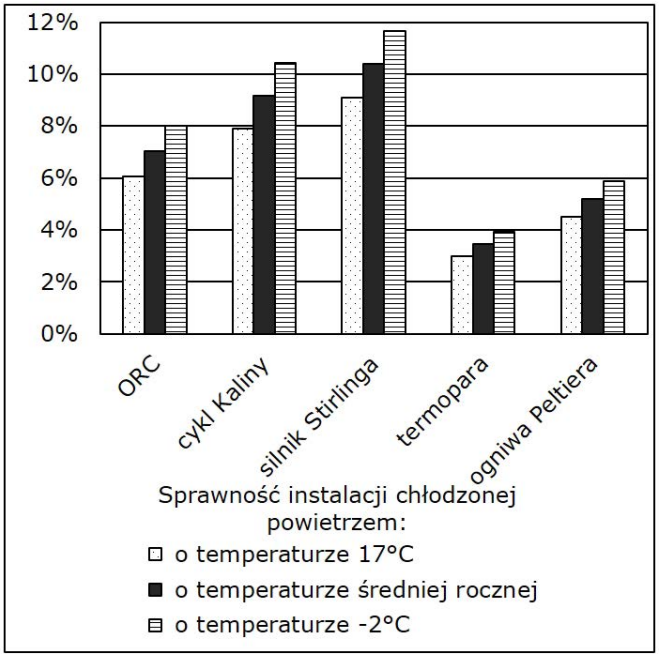
Table 3

Efficiencies of the analyzed systems

Rodzaj instalacji	Sprawność przy zastosowaniu chłodzenia:					
	powietrzem			wodą z cieku powierzchniowego		
	minimum	maksimum	średnia	minimum	maksimum	średnia
ORC	6,08%	8,02%	7,05%	6,38%	7,14%	6,76%
Cykl Kaliny	7,91%	10,42%	9,17%	8,30%	9,28%	8,79%
Silnik Stirlinga	9,11%	11,66%	10,39%	9,52%	10,52%	10,02%
Termopara	3,01%	3,95%	3,48%	3,16%	3,53%	3,34%
Ogniwa Peltiera	4,50%	5,89%	5,19%	4,71%	5,26%	4,99%

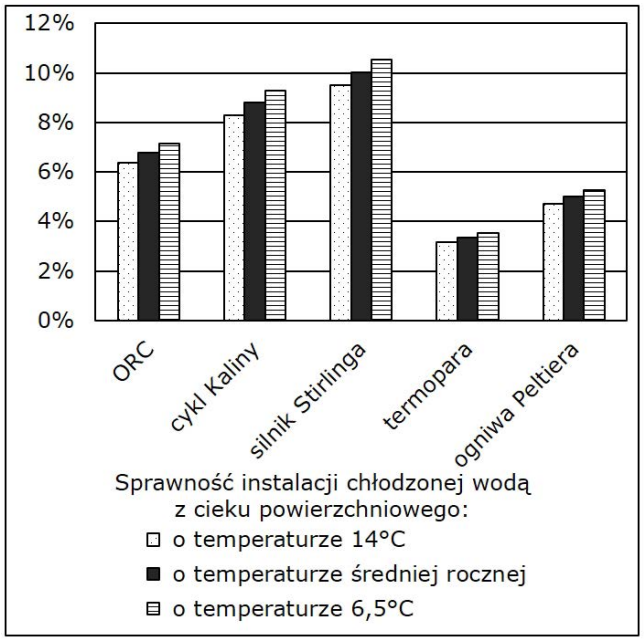
5.2. Generacja energii elektrycznej

Opierając się na wartości sprawności, otrzymano zestawienie możliwej do uzyskania produkcji energii elektrycznej. Wartość minimalna produkcji została obliczona przy założeniu maksymalnej temperatury dolnego źródła. Wartość maksymalna zakłada pracę przy minimalnej temperaturze dolnego źródła. Teoretyczną produkcję roczną obrazuje więc wartość średnia (tab. 4, rys. 8).



Rys. 6. Zmienność sprawności układu w zależności od zmiany temperatury powietrza

Fig. 6. Efficiency variability – dependent on air temperature changes



Rys. 7. Zmienność sprawności układu w zależności od zmiany temperatury wody w cieku powierzchniowym

Fig. 7. Efficiency variability – dependent on watercourse temperature changes

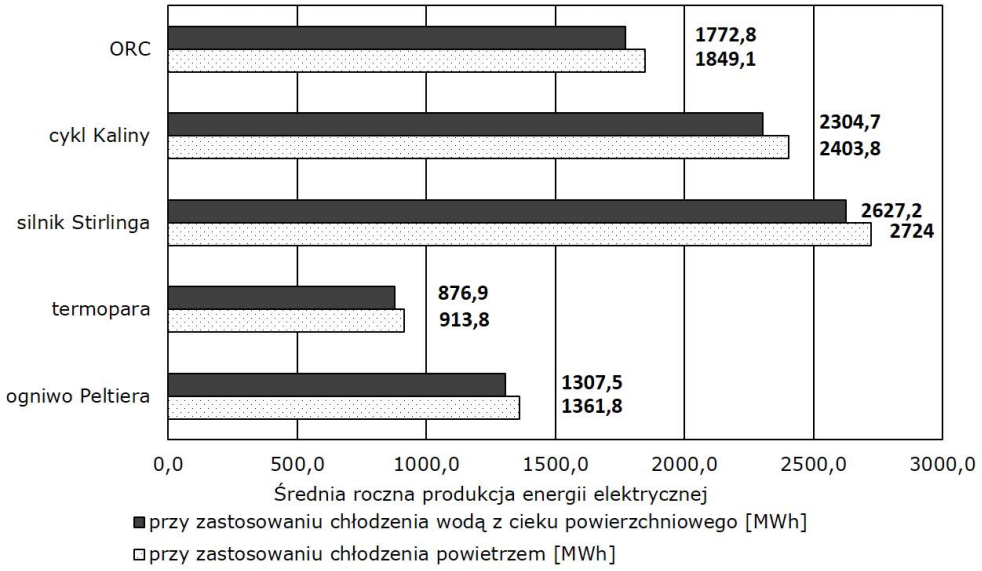
Tabela 4

Ilość wygenerowanej energii elektrycznej przy schłodzeniu wody geotermalnej o 10 K

Table 4

Comparison of theoretical average electricity production (per year) – 10 K geothermal water cooling

Rodzaj instalacji	Produkcja energii elektrycznej [MWh] przy zastosowaniu chłodzenia:					
	powietrzem			wodą z cieku powierzchniowego		
	minimum	maksimum	średnia	minimum	maksimum	średnia
ORC	1 595,4	2 102,8	1 849,1	1 673,5	1 872,1	1 772,8
Cykl Kaliny	2 074,0	2 733,7	2 403,8	2 175,6	2 433,7	2 304,7
Silnik Stirlinga	2 390,0	3 057,8	2 723,9	2 495,4	2 759,0	2 627,2
Termopara	790,5	1 037,0	913,8	828,7	925,2	876,9
Ogniwa Peltiera	1 179,7	1 543,9	1 361,8	1 236,1	1 378,9	1 307,5



Rys. 8. Porównanie średnich rocznych produkcji energii elektrycznej przy schłodzeniu wód geotermalnych o 10 K

Fig. 8. Comparison of theoretical average electricity production (per year) – 10 K geothermal water cooling

UWAGI KOŃCOWE

Sprawności systemów generowania energii elektrycznej, wykorzystujących energię geotermalną z otworu Bańska PGP-3 według wyliczeń wykonanych w analizie będzie niska, zawierająca się w przedziale 3–12% (tab. 3, rys. 6 i 7). W praktyce takie wartości są akceptowalne (najczęściej chodzi tu o uzasadnienie ekonomiczne) tylko gdy nie ma możliwości

wykorzystania innych źródeł energii. Przykładem może być instalacja na Alasce, której sens istnienia pomimo niskiej sprawności bierze się z niewielkiej dostępności innych surowców energetycznych oraz dużej odległości od innych źródeł zasilania.

Porównanie odbiorników ciepła nasuwa wnioski zgodne z opisem teoretycznym. Dobierając chłodnicę należy pamiętać, że o ile w przypadku chłodzenia wodą z Białego Dunajca zmiany temperatur zachodzić będą mało dynamicznie w ciągu roku, tak w przypadku chłodzenia powietrzem parametry te będą się zmieniać w trakcie jednego dnia – dynamicznie – co nie służy długiemu działaniu instalacji. Dlatego też – mimo niewiele wyższej sprawności – lepszym rozwiązaniem będzie chłodzenie ciekami powierzchniowymi.

Stworzenie instalacji opartej na działaniu silnika Stirlinga lub ogniw termoelektrycznych może być obecnie bardzo trudne – zarówno ze względów technicznych (małe moce dostępnych urządzeń) jak i ekonomicznych (drogie podzespoły). Należy więc te źródła traktować jako perspektywiczne – dalszy rozwój technologii może umożliwić próby uruchomienia takich instalacji.

LITERATURA

BUJAKOWSKI W., TOMASZEWSKA B. (red. nauk), 2014 — Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej w układach binarnych w Polsce, Kraków.

DiPIPPO R., 2007 — Ideal thermal efficiency for geothermal binary plants. [W:] Geothermics vol. 36, 276–285.

ELSAYED A., EMBAYE M., AL-DADAH R., MAHMOUD S., REZK A., 2013 — Thermodynamic performance of Kalina cycle system 11 (KCS11): feasibility of using alternative zeotropic mixtures. [W:] International Journal of Low-Carbon Technologies vol. 8, issue suppl 1, 69–78.

HOLDMANN G., 2007 — The Chena Hot Springs 400kW Geothermal Power Plant: Experience Gained During the First Year of Operation. [W:] Renewable Baseload Energy: Geothermal Heat Pumps to Engineered Reservoirs vol. 31, 515–519, Davis.

KRÓLICKA A., HRUBAN A., MIROWSKA A., 2012 — Nowoczesne materiały termoelektryczne – przegląd literaturowy. [W:] Materiały Elektroniczne (Electronic Materials), t. 40, nr 4, 19–34, ITME, Warszawa.

LEWANDOWSKI W. M., RYMS M., KOŁOŁA R., KUBSKI P., KLUGMANN-RADZIEMSKA E., OSTROWSKI P., 2010 — Poprawa sprawności układów ORC i systemów trigeneracyjnych poprzez zastosowanie różnych termodynamicznych wariantów ich działania. [W:] Nafta-Gaz nr 9, 794–799.

LIU C., CHEN P., LI K., 2014 — A 1 KW Thermoelectric Generator for Low-temperature Geothermal Resources. [W:] PROCEEDINGS, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24–26.

MAZUREK R., VALDIMARSSON P., 2011 — Wpływ temperatury wody geotermalnej o niskiej i średniej entalpii na pracę elektrowni z obiegiem Kaliny w warunkach polskich. [W:] Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 1–2, 177–185.

NOUMAN J., 2012 — Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine – Master of Science Thesis, Sztokholm.

NOWAK W., BORSUKIEWICZ-GOZDUR A., 2011 — Siłownie ORC sposobem na wykorzystanie energii ze źródeł niskotemperaturowych. [W:] Czysta Energia nr 2.

ORC Power Plant Neustadt – Glewe, Operational Experience Since 2004, dokument elektroniczny, dostęp pod adresem http://engine.brgm.fr, dostęp dnia 19.12.2015.

PAPIEROWSKA E., CHACZYKOWSKI M., 2013 — Wykorzystanie technologii ORC w celu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. [W:] Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 61, 336–347.

PASKA J., 2005 — Wytwarzanie energii elektrycznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

PASKA J., 2010 — Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

ŚLIMAK C., OKULARCZYK B., 2014 — Energia geotermalna w praktyce – 20 lat doświadczeń PEC Geotermia Podhalańska S.A. [W:] Czy mamy potencjał energii geotermalnej w Polsce? – materiały z seminarium eksperckiego, dokument elektroniczny, dostęp pod adresem http://www.mos.gov.pl, dostęp dnia 17.12.2015.

Załącznik Nr 1 Do decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach z dnia 17 września 2014 roku znak OS.6220.4.6.2014 dla inwestycji pod nazwą: Wydobywanie kopalin za złóż metodą otworów wiertniczych, wydobywanie wód termalnych otworami Bańska IG-1, Bańska PGP-1 i Bańska PGP-3 w miejscowości Bańska Niżna, dokument elektroniczny, dostęp pod adresem http://bip.malopolska.pl, dostęp dnia 17.12.2015.

ŻMUDZKI S., 1993 — Silniki Stirlinga. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Linkografia

http://www.is.pw.edu.pl/~michal_strzeszewski/ioiw/wlasciwosci.pdf, dostęp dnia 19.12.2015.

http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html, dostęp dnia 20.12.2015.

http://www.pieninypn.pl, dostęp dnia 18.12.2015.

http://www.stirlingengine.com, dostęp dnia 20.12.2015.

https://www.meteoblue.com, dostęp dnia 18.12.2015.

ANALYSIS OF THE TECHNICAL POSSIBILITIES IN USING GEOTERMAL ENERGY FOR ELECTRICITY GENERATION FOR THE BANSKA PGP-3 BOREHOLE

ABSTRACT

An analysis of the possibilities of using geothermal energy to generate electricity, calculated for the Banska PGP-3 borehole. Description of a typical solution – Organic rankine cycle, Kalina cycle. Concept of using

a Stirling engine and thermoelectric cells. For typical solutions – an analysis of potential efficiency, based on cooler parameters. For other solutions – mathematical formulas calculation. Results – efficiency 3% for thermocouple, 5% for Peltier cells, 7% for ORC, 9% for Kalina cycle, 11,6% for Stirling engine. Summary – theoretical generation for of electricity for established parameters. Results – 0,9 GWh for thermocouple, 1,3 GWh for Peltier cells, 1,8 GWh for ORC, 2,3 GWh for Kalina cycle and 2,6 GWh for Stirling engine.

KEYWORDS

Geothermal energy, electricity, ORC, Kalina cycle, thermocouple, Stirling engine