

Sławomir WIŚNIEWSKI  
Katedra Techniki Ciepłej  
Centrum Badawczo-Rozwojowe Siłowni ORC  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny  
w Szczecinie  
al. Piastów 19, 70-310 Szczecin  
e-mail: slawomir.wisniewski@zut.edu.pl

Technika Poszukiwań Geologicznych  
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2016

## ANALIZA PRACY ELEKTROCIEPŁOWNI GEOTERMALNEJ Z OBIEGIEM ORC

### STRESZCZENIE

W niniejszym artykule przedstawiona została wstępna analiza funkcjonowania elektrociepłowni wykorzystującej zasoby geotermalne Niżu Polskiego.

W założeniach przyjęto, że strumień wydobywanej wody termalnej wynosi  $\dot{V}_g = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ , temperatura na wypływie  $t_{g1} = 100^\circ\text{C}$ , mineralizacja  $S = 120 \text{ g/kg}$ . System pozyskiwania energii geotermalnej składa się z dubletu geotermalnego. W warunkach Niżu Polskiego wydobywana woda termalna zazwyczaj charakteryzuje się wysoką mineralizacją, co zostało uwzględnione w obliczeniach związanych z możliwością wykorzystania tych zasobów, z uwagi na fakt zmienności pojemności cieplnej właściwej oraz gęstości wraz ze zmianą mineralizacji. W pracy przeanalizowano dwa warianty: wariant 1 (letni), wariant 2 (zimowy). W wariacie 1 woda termalna kierowana jest w pierwszej kolejności do układu ORC, a następnie do systemu ciepłowniczego. W wariacie drugim woda termalna najpierw przepływa przez wymiennik systemu ciepłowniczego, a następnie jest kierowana do układu ORC. Obliczenia wykazały, że w obu wariantach istnieje możliwość generacji energii elektrycznej w układzie ORC rozpatrywanej elektrociepłowni przy jednoczesnym dostarczaniu ciepła. Przedstawione rozwiązania dają również możliwość zmiany temperatury nośnika ciepła w sieci ciepłowniczej poprzez zmianę temperatury odparowania czynnika organicznego, zmianę wariantu lub wykorzystanie wymiennika regeneracyjnego.

### SŁOWA KLUCZOWE

Elektrociepłownia geotermalna, siłownia ORC, czynnik roboczy, czynnik organiczny, energia geotermalna

\* \* \*

## WPROWADZENIE

Rozwój technologiczny, a tym samym cywilizacyjny, nieodzownie związany jest z dostępnością energii. Spośród źródeł energii, które aktualnie są dostępne, a do których zaliczyć można przede wszystkim energię z paliw kopalnych, energię jądrową czy też energię ze źródeł odnawialnych, najbardziej negatywny wpływ na środowisko mają paliwa kopalne. Wynika to z procesu konwersji energii chemicznej tych paliw na inne formy energii (cieplną, mechaniczną lub elektryczną), której jednym z etapów jest ich spalanie. W wyniku procesu spalania tych paliw wydzielające się produkty w postaci CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i pyłów przedostają się do środowiska wywołując negatywne skutki, takie jak: zauważalne zmiany klimatyczne, kwaśne deszcze czy też zjawiska smogu. Wykorzystywanie paliw jądrowych jest mniej uciążliwe dla środowiska, ale pozostaje problem związany z sytuacjami awaryjnymi oraz ze składowaniem zużytego paliwa jądrowego.

Najmniejsze obciążenia środowiskowe powodowane są przez instalacje wykorzystujące odnawialne źródła energii. W fazie eksploatacji tych instalacji można nawet przyjąć, że są to instalacje zeroemisyjne. W tym miejscu trzeba jednak podkreślić, że przy ocenie wpływu instalacji wykorzystujących OZE na środowisko naturalne należy brać pod uwagę cały cykl życia, tzn. zarówno fazę wytwarzania, jak i fazę utylizacji. Wynika to z faktu, że przy budowie oraz rozmontowywaniu i utylizacji ponoszone są określone nakłady energetyczne (zużywana jest energia i materiały), co powoduje też określone obciążenia środowiskowe.

Poza aspektami ekologicznymi, zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii jest jednym ze strategicznych celów krajów Unii Europejskiej w ramach polityki energetycznej. Zostało to między innymi ujęte w zapisach tak zwanego pakietu klimatyczno-energetycznego 3x20, z którego wynika, że w Polsce do roku 2020 udział odnawialnych źródeł energii w całkowitym zużyciu energii ma wzrosnąć do poziomu 15%.

Rada Europy nakreśliła również ramy polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030. Z zapisów tych wynika między innymi, że do roku 2030 udział energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii w krajach Unii Europejskiej ma wynosić co najmniej 27%, a emisja gazów cieplarnianych ma zostać ograniczona o co najmniej 40% w stosunku do poziomu emisji z roku 1990.

W Polsce od kilku lat mamy do czynienia z niewielkim wzrostem udziału OZE w całkowitym wykorzystaniu energii, co dobitnie potwierdzają dane publikowane przez Główny Urząd Statystyczny odnośnie wykorzystania odnawialnych źródeł energii (Berent-Kowalska i in. 2014) Wynika z nich, że w latach 2012–2014 udział OZE był praktycznie na stałym poziomie i wynosił poniżej 12% (brak tendencji wzrostowej). Te informacje w świetle zapisów pakietu klimatyczno-energetycznego nie wyglądają zbyt optymistycznie.

Spośród odnawialnych źródeł energii w Polsce bardzo dobrze rozpoznane i udokumentowane są zasoby energii geotermalnej. Zasoby te w całości, z uwagi na aspekt ekonomiczny, nie mogą być wykorzystane. Rynkowy potencjał geotermii szacowany jest na 4050 TJ (Wiśniewski 2007). Możliwości praktycznego wykorzystania zasobów energii geotermalnej w dużej mierze zależą od jej jakości (temperatury nośnika energii geotermalnej). Zgodnie

z gradientem geotermicznym temperatura ta wzrasta wraz z głębokością, z której energia ta jest pozyskiwana. W warunkach polskich temperatury wód termalnych i skał mogą osiągać wartość 100°C przy głębokościach 3000 metrów (Górecki i in. 2006). Są to stosunkowo niewysokie temperatury, które w klasycznych systemach energetycznych dają jedynie możliwość wykorzystania tej energii na cele ciepłownicze. Z tego względu w Polsce energia geotermalna wykorzystywana jest do celów ciepłowniczych (ciepłownie geotermalne), rekreacyjnych (kompleksy basenowe) oraz leczniczych (uzdrowiska, sanatoria wykorzystujące wody termalne) (Kępińska 2013).

W innych krajach energia geotermalna z powodzeniem wykorzystywana jest również do generacji energii elektrycznej (Kaczmarczyk 2011). W zależności od parametrów i stanu czynnika (woda, para) wydobywanego z ziemi, można wyróżnić kilka rodzajów elektrowni geotermalnych (DiPippo 2005).

Pierwsze to elektrownie, w których czynnikiem obiegowym jest para wydobywana bezpośrednio z ziemi lub para uzyskana dzięki rozprężeniu wody termalnej.

W przypadku niższych temperatur złoża geotermalnego w elektrowniach stosowany jest czynnik obiegowy inny niż woda, który w porównaniu do wody ma niższą temperaturę wrzenia (przy stosunkowo wysokich ciśnieniach). Obiegi takie nazywane są organicznymi obiegami Rankine'a, czyli ORC (ang. *Organic Rankine Cycle*) (Borsukiewicz-Gozdur 2010).

Kolejnym rozwiązaniem stosowanym w elektrowniach geotermalnych jest siłownia z obiegiem Kaliny. W układach tych czynnikiem obiegowym jest mieszanina wody i innej substancji, np. amoniaku (Mazurek i Valdimarsson 2011).

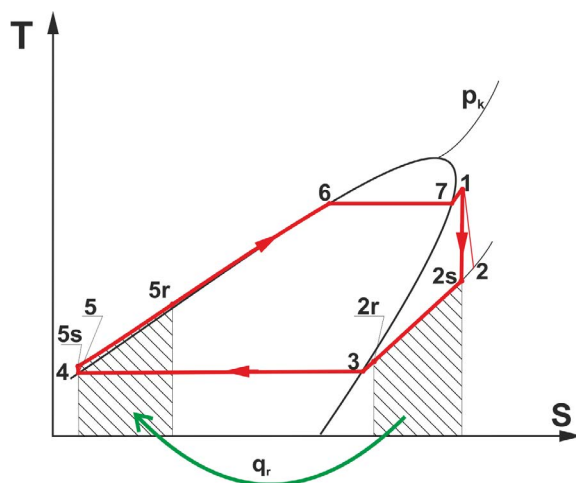
## 1. OPIS UKŁADU ELEKTROCIĘPŁOWNI GEOTERMALNEJ

Analizowany w pracy układ to elektrociepłownia wykorzystująca energię geotermalną, która doprowadzana jest za pośrednictwem strumienia wydobywanej wody termalnej. Elektrociepłownia składa się z obiegu ORC, wymiennika ciepła oraz dodatkowego źródła ciepła. W pracy przyjęto, że dodatkowym źródłem ciepła w układzie będzie kocioł opalany biomasą. Takie rozwiązanie sprawia, że cała instalacja wykorzystuje tylko odnawialne źródła energii. W poniższych rozważaniach analiza pracy kotła nie była brana pod uwagę (kocioł ten ma zapewnić jedynie dogrzanie grzewczej wody sieciowej do wymaganej temperatury).

Z uwagi na to, że zapotrzebowanie ciepła na cele grzewcze (c.o. i c.w.u.) jest zmienne w czasie (zależy od temperatury zewnętrznej), w układzie przewidziana jest możliwość zmiany obciążenia pomiędzy układem ORC a wymiennikiem ciepła. Takie rozwiązanie sprawia, że w większym stopniu wykorzystywany jest potencjał złoża geotermalnego.

Układ ORC wchodzący w skład elektrociepłowni składa się kolejno z wymiennika ciepła, w którym czynnik niskowrzący jest podgrzewany i odparowywany, turbogeneratorskiego, skraplacza, pompy obiegu oraz wymiennika regeneracyjnego. Zastosowanie wymiennika regeneracyjnego w układzie ORC wynika z tego, że jako czynnik obiegowy założono tak zwany czynnik suchy. Czynniki z tej grupy charakteryzują się tym, że para po

rozprężaniu w turbinie jest parą przegrzaną (wynika to z przebiegu krzywej nasycenia  $x = 1$ ) o wyższej temperaturze niż temperatura skraplania. W pewnych przypadkach pozwala to na wstępne podgrzewanie skroplin za pomocą pary opuszczającej turbinę obiegu ORC. Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu ORC przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku tym zobrazowano również proces regeneracji ciepła w analizowanym układzie.

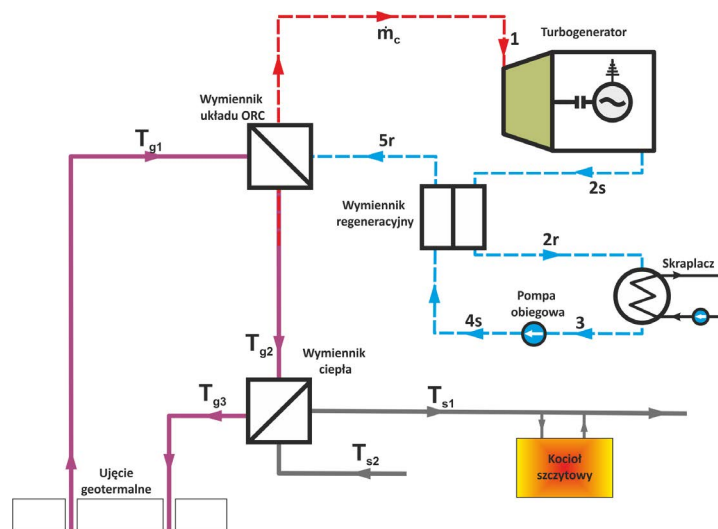


Rys. 1. Cykl przemian termodynamicznych obiegu ORC dla czynnika R227ea

Fig. 1. Thermodynamic processes of the ORC cycle for R227ea

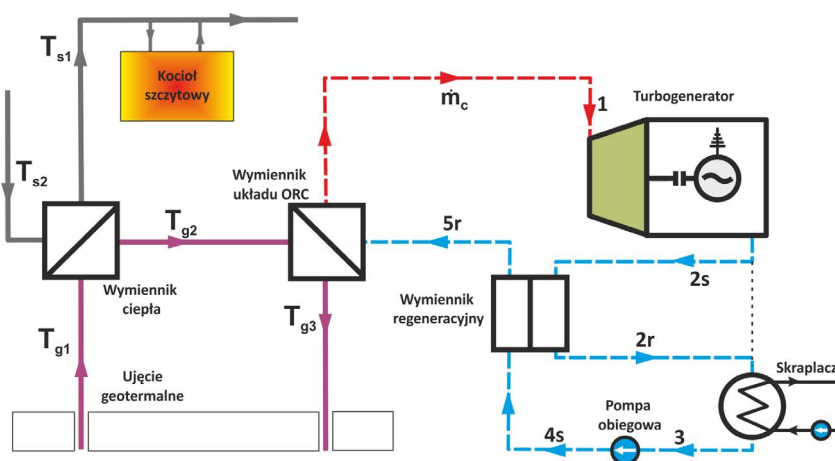
W okresach mniejszego zapotrzebowania na ciepło elektrociepłownia funkcjonuje w konfiguracji przedstawionej na rysunku 2 (wariant 1). W wariantcie tym założono, że woda powracająca z systemu ciepłowniczego ma temperaturę  $t_{s2} = 40^{\circ}\text{C}$ . W tym przypadku woda termalna w pierwszej kolejności kierowana jest do wymiennika układu ORC. Z wymiennika ORC woda ta kierowana jest do wymiennika ciepłowniczego. Z uwagi na stosunkowo wysokie parametry pary na wypływie z turbiny w układzie ORC zasadne jest zastosowanie wymiennika regeneracyjnego.

W okresie zimowym, kiedy zapotrzebowanie na ciepło jest największe, układ elektrociepłowni pracuje zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3. W wariantcie tym założono, że woda powracająca z systemu ciepłowniczego ma temperaturę  $t_{s2} = 60^{\circ}\text{C}$ . Woda ta w wymienniku ciepła podgrzewana jest przez kierowaną bezpośrednio z otworu wydobywczego, wodę termalną. Dla przyjętej różnicy temperatur w tym wymienniku (rys. 3b) na poziomie  $5^{\circ}\text{C}$ , temperatura wody termalnej opuszczającej ten wymiennik wynosi  $65^{\circ}\text{C}$ . Następnie woda termalna kierowana jest do układu ORC. W układzie ORC woda termalna przepływając przez wymiennik przekazuje energię do czynnika roboczego. Czynnik roboczy, po odparowaniu, z niewielkim przegrzaniem, kierowany jest do turbiny. Z turbiny, w zależności od temperatury pary na jej wypływie, czynnik albo kierowany jest do skraplacza (przy zbliżonej temperaturze pary do temperatury skraplania), albo przed skierowaniem do skraplacza kierowany jest do wymiennika regeneracyjnego.



Rys. 2. Schemat elektrociepłowni geotermalnej – wariant 1

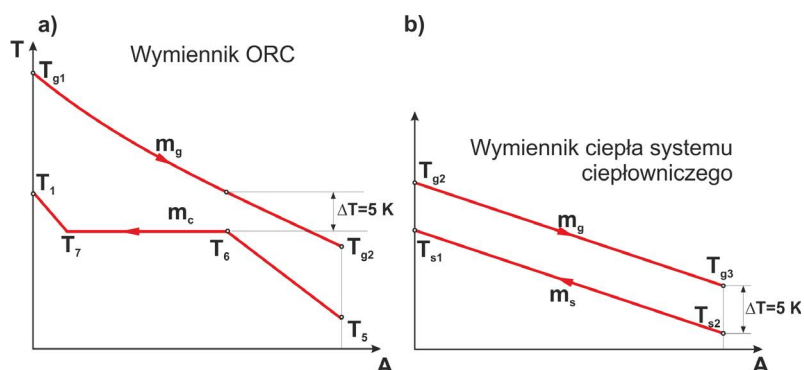
Fig. 2. Scheme of geothermal heat and power plant – variant 1



Rys. 3. Schemat elektrociepłowni geotermalnej – wariant 2

Fig. 3. Scheme of geothermal heat and power plant – variant 2

Na rysunku 4 przedstawione zostały rozkłady temperatur dla nośników ciepła w wymienniku układu ORC oraz w wymienniku ciepła systemu ciepłowniczego.



Rys. 4. Pole temperatur nośników ciepła w: a) wymienniku ciepła układu ORC, b) wymienniku ciepła systemu ciepłowniczego

Fig. 4. Temperature range of the heat carrier in: a) ORC heat exchanger, b) heating system heat exchanger

## 2. METODYKA OBLICZEŃ

W rozdziale przedstawione zostały zależności wykorzystane w ocenie efektywności pracy rozpatrywanych wariantów elektrociepłowni geotermalnej. W ocenie tej uwzględnione zostały uwagi prezentowane w pracy (Miecznik 2013) dotyczące pomijania wpływu temperatury i stopnia mineralizacji wody termalnej na wartość parametru ciepła właściwego i gęstości tej wody. Jak wykazano w tej pracy przyjęcie standardowych wartości ciepła właściwego i gęstości dla wody (brak mineralizacji, temperatura 20°C) może prowadzić do znacznych błędów obliczeniowych. Z tego względu w pierwszej kolejności określone zostały parametry wody termalnej, tzn. gęstość oraz pojemność cieplna właściwa na podstawie przyjętej temperatury wody oraz stopnia mineralizacji. Zależności (1) i (2) pozwalające określić te wielkości przedstawiono poniżej:

— gęstość, zakres stosowalności  $t = 0\text{--}180^\circ\text{C}$ ,  $S = 0\text{--}0,16\text{ kg/kg}$  (Sharqawy i in. 2010)

$$\rho_w(t, s) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 t^4 + b_1 s + b_2 s t + b_3 s t^2 + b_4 s t^3 + b_5 s^2 t^2 \quad (1)$$

gdzie:

$$a_1 = 9,999 \cdot 10^2; a_2 = 2,034 \cdot 10^{-2}; a_3 = -6,162 \cdot 10^{-3}; a_4 = 2,261 \cdot 10^{-5}; a_5 = -4,657 \cdot 10^{-8};$$

$$b_1 = 8,020 \cdot 10^2; b_2 = -2,001; b_3 = 1,677 \cdot 10^{-2}; b_4 = -3,060 \cdot 10^{-5}; b_5 = -1,613 \cdot 10^{-5}$$

$t$  – temperatura [ $^\circ\text{C}$ ],

$S$  – mineralizacja [kg/kg];

— ciepło właściwe, zakres stosowalności  $T = 273,15\text{--}453,15\text{ K}$ ,  $S = 0\text{--}180\text{ g/kg}$  (Jamieson i in. 1969)

$$c_w(T, S) = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (2)$$

$$A = 5,328 - 9,760 \cdot 10^{-2} S + 4,040 \cdot 10^{-4} S^2 \quad (2a)$$

$$B = -6,913 \cdot 10^{-3} + 7,351 \cdot 10^{-4} S - 3,150 \cdot 10^{-6} S^2 \quad (2b)$$

$$C = 9,600 \cdot 10^{-6} - 1,927 \cdot 10^{-6} S + 8,230 \cdot 10^{-9} S^2 \quad (2c)$$

$$D = 2,500 \cdot 10^{-9} + 1,666 \cdot 10^{-9} S - 7,125 \cdot 10^{-12} S^2 \quad (2d)$$

gdzie:

- $T$  – temperatura [K],
- $S$  – mineralizacja [g/kg].

W obliczeniach ciepłno-przepływowych przyjęto uproszczenie, polegające na pominięciu strat ciepła do otoczenia we wszystkich analizowanych wymiennikach ciepła.

Z uwagi na przyjęte założenie minimalnej różnicy temperatur (ang. *pinch point*) w wymienniku ciepła układu ORC  $\Delta T = 5$  K strumień masowy czynnika organicznego w obiegu ORC wyznaczono na podstawie bilansu energii części wymiennika obejmującej proces odparowania i przegrzania czynnika organicznego.

Strumień ciepła potrzebny do odparowania i przegrzania czynnika organicznego określono na podstawie zależności:

$$\dot{Q}_{par+prz} = \dot{m}_n (h_1 - h_6) \quad (3)$$

gdzie:

- $h$  – entalpia właściwa czynnika organicznego (indeks oznacza odpowiedni punkt charakterystyczny obiegu ORC) [kJ/kg].

Strumień ciepła określony równaniem (3) jest równy strumieniowi ciepła doprowadzanemu przez wodę termalną w tej części wymiennika, co można zapisać zależnością:

$$\dot{Q}_{par+prz} = \dot{m}_g c_w (t_{g1} - t_6 + \Delta T) \quad (4)$$

gdzie:

- $\dot{m}_g$  – strumień masowy wody termalnej [kg/s],
- $t_g$  – strumień masowy wody termalnej w poszczególnych punktach układu [°C],
- $t_6$  – temperatura czynnika organicznego (indeks oznacza odpowiedni punkt charakterystyczny obiegu ORC) [°C].

Wykorzystując równania (3) i (4) wyznaczono zależności na strumień masowy czynnika organicznego w obiegu ORC. Zależność ta przyjmuje następującą postać:

$$\dot{m}_n = \frac{\dot{m}_g c_w (t_{g1} - t_6 + \Delta T)}{h_1 - h_6}; \text{ dla wariantu 1} \quad (5a)$$

$$\dot{m}_n = \frac{\dot{m}_g c_w (t_{g2} - t_6 + \Delta T)}{h_1 - h_6}; \text{ dla wariantu 2} \quad (5b)$$

Temperaturę wody termalnej opuszczającej wymiennik układu ORC określono na podstawie bilansu energii całego wymiennika ciepła układu ORC. Po odpowiednich przekształceniach zależność ta przyjmuje następującą postać:

$$t_{g2} = t_{g1} - \frac{\dot{m}_n (h_1 + h_5)}{\dot{m}_g c_w}; \text{ dla wariantu 1} \quad (6a)$$

$$t_{g3} = t_{g2} - \frac{\dot{m}_n (h_1 + h_5)}{\dot{m}_g c_w}; \text{ dla wariantu 2} \quad (6b)$$

W powyższych zależnościach (6a, 6b) w przypadku układu z regeneracją ciepła (gdy w układzie funkcjonuje wymiennik regeneracyjny) zamiast entalpii właściwej  $h_5$  wstawić należy entalpię właściwą  $h_{5r}$ .

Parametry punktów charakterystycznych układu ORC 2 i 5 określono wykorzystując zależności na sprawność wewnętrzną turbiny  $\eta_{it}$  (7) i pompy  $\eta_{ip}$  (8) (obie sprawności przyjęto na poziomie 0,80):

$$\eta_{it} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (7)$$

$$\eta_{ip} = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} \quad (8)$$

Moc obiegu ORC ( $N_{ORC}$ ) obliczano według następującej zależności (z uwzględnieniem pracy potrzebnej do napędu pompy):

$$N_{ORC} = \dot{m}_n (h_1 - h_2) \eta_{mt} - \frac{\dot{m}_n (h_5 - h_4)}{\eta_{mp}} \quad (9)$$

gdzie:

- $\eta_{mt}$  – sprawność mechaniczna turbiny (0,99),
- $\eta_{mp}$  – sprawność mechaniczna pompy (0,99),

Moc elektryczną  $N_{el}$  na wyjściu z generatora siłowni ORC określa zależność (10). W obliczeniach przyjęto sprawność generatora  $\eta_g = 0,98$ :



$$N_{el} = \eta_g N_{ORC} \quad (10)$$

Strumień ciepła geotermalnego  $\dot{Q}_{cg}$  wykorzystywanego na cele cieplownicze określono z następującej zależności:

$$\dot{Q}_{cg} = \dot{m}_g c_w (t_{g2} - t_{g3}); \quad \text{dla wariantu 1} \quad (11a)$$

$$\dot{Q}_{cg} = \dot{m}_g c_w (t_{g1} - t_{g2}); \quad \text{dla wariantu 2} \quad (11b)$$

### 3. ZAŁOŻENIA I WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia przeprowadzono dla jednego czynnika roboczego obiegu ORC, tj. dla czynnika R227ea. Parametry krytyczne tego czynnika to  $t_k = 101,75^\circ\text{C}$ ,  $p_k = 2,925 \text{ MPa}$ .

W obliczeniach przyjęto, że wydobywana woda termalna na wypływie z otworu ma temperaturę  $t_{g1} = 100^\circ\text{C}$ , a wydajność dubletu geotermalnego wynosi  $=100 \text{ m}^3/\text{h}$ . Przyjęto również, że mineralizacja wody termalnej wynosi  $S = 120 \text{ g/kg}$ . Na podstawie zależności (1) i (2) wyznaczono gęstość i ciepło właściwe wody termalnej, które wynoszą odpowiednio:  $\rho_w = 1046,9 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_w = 3,67 \text{ kJ/(kg/K)}$ .

Obieg ORC funkcjonujący w rozpatrywanej elektrociepłowni jest obiegiem na parametry podkrytyczne, przy czym w obiegu tym uwzględniono lekkie przegrzanie czynnika roboczego, wynoszące  $5^\circ\text{C}$  powyżej temperatury odparowania (rys. 1).

Wymiana ciepła pomiędzy wodą termalną a czynnikiem R227ea odbywa się w wymienniku ciepła, dla którego przyjęto minimalną różnicę temperatur pomiędzy tymi czynnikami wynoszącą  $\Delta T = 5 \text{ K}$  (ang. *pinch point*). Różnicę tą pokazano na rysunku 4 obrazującym rozkład temperatury w wymienniku ciepła układu ORC.

Skraplanie czynnika obiegowego w układzie ORC odbywa się w temperaturze  $t_{skr} = 30^\circ\text{C}$ , a skraplacz chłodzony jest wodą z dowolnego zbiornika naturalnego. Dla wariantu 2 rozpatrzono także układ ze skraplaniem czynnika w temperaturze  $t_{skr} = 15^\circ\text{C}$  (z uwagi na niższe temperatury zewnętrzne).

W poniższych tabelach przedstawiono parametry termiczne i kaloryczne czynnika obiegowego w poszczególnych punktach obiegu ORC oraz uzyskane wyniki obliczeń.

W tabeli 1 przedstawiono parametry czynnika R227ea dla wariantu 1, natomiast w tabeli 2 parametry czynnika dla wariantu 2.

W kolejnej tabeli przedstawiono wyniki obliczeń dla rozpatrywanych wariantów elektrociepłowni.

Tabela 1

Termiczne i kaloryczne parametry czynnika obiegowego w poszczególnych punktach obiegu ORC  
(wariant 1)

Table 1

Thermal and caloric parameters of the working fluids in ORC installation (variant 1)

| Punkt obiegu | $t_{par} = t_6 = t_7 = 75^{\circ}\text{C}$ |      |       | $t_{par} = t_6 = t_7 = 80^{\circ}\text{C}$ |      |       | $t_{par} = t_6 = t_7 = 85^{\circ}\text{C}$ |      |       | $t_{par} = t_6 = t_7 = 90^{\circ}\text{C}$ |      |       |
|--------------|--------------------------------------------|------|-------|--------------------------------------------|------|-------|--------------------------------------------|------|-------|--------------------------------------------|------|-------|
|              | $t$                                        | $p$  | $h$   | $t$                                        | $P$  | $h$   | $t$                                        | $p$  | $h$   | $t$                                        | $p$  | $h$   |
|              | $^{\circ}\text{C}$                         | MPa  | kJ/kg | $^{\circ}\text{C}$                         | MPa  | kJ/kg | $^{\circ}\text{C}$                         | MPa  | kJ/kg | $^{\circ}\text{C}$                         | MPa  | kJ/kg |
| 1            | 80,0                                       | 1,66 | 373,1 | 85,0                                       | 1,86 | 375,1 | 90,0                                       | 2,07 | 377,0 | 95,0                                       | 2,30 | 378,4 |
| 2s           | 46,2                                       | 0,53 | 358,2 | 47,0                                       | 0,53 | 358,9 | 47,6                                       | 0,53 | 359,4 | 48,0                                       | 0,53 | 359,7 |
| 2            | 49,5                                       | 0,53 | 361,1 | 50,6                                       | 0,53 | 362,1 | 51,5                                       | 0,53 | 362,9 | 52,1                                       | 0,53 | 363,5 |
| 3            | 30,0                                       | 0,53 | 343,4 | 30,0                                       | 0,53 | 343,4 | 30,0                                       | 0,53 | 343,4 | 30,0                                       | 0,53 | 343,4 |
| 4            | 30,0                                       | 0,53 | 234,6 | 30,0                                       | 0,53 | 234,6 | 30,0                                       | 0,53 | 234,6 | 30,0                                       | 0,53 | 234,6 |
| 5s           | 30,7                                       | 1,66 | 235,5 | 30,8                                       | 1,86 | 235,6 | 30,9                                       | 2,07 | 235,8 | 31,0                                       | 2,30 | 235,9 |
| 5            | 30,8                                       | 1,66 | 235,7 | 31,0                                       | 1,86 | 235,8 | 31,1                                       | 2,07 | 236,0 | 31,3                                       | 2,30 | 236,2 |
| 6            | 75,0                                       | 1,66 | 293,1 | 80,0                                       | 1,86 | 300,4 | 85,0                                       | 2,07 | 308,2 | 90,0                                       | 2,30 | 316,4 |
| 7            | 75,0                                       | 1,66 | 366,7 | 80,0                                       | 1,86 | 368,3 | 85,0                                       | 2,07 | 369,4 | 90,0                                       | 2,30 | 369,8 |
| 2r           | 35,0                                       | 0,53 | 347,9 | 35,0                                       | 0,53 | 347,9 | 35,0                                       | 0,53 | 347,9 | 35,0                                       | 0,53 | 347,9 |
| 5r           | 41,8                                       | 1,66 | 248,9 | 42,7                                       | 1,86 | 250,0 | 43,6                                       | 2,07 | 251,0 | 44,2                                       | 2,30 | 251,8 |

Tabela 2

Termiczne i kaloryczne parametry czynnika obiegowego w poszczególnych punktach obiegu ORC  
(wariant 2)

Table 2

Thermal and caloric parameters of the working fluids in ORC installation (variant 2)

| Punkt obiegu | $t_{skr} = t_3 = t_4 = 30^{\circ}\text{C}$ |       |       | $t_{skr} = t_3 = t_4 = 15^{\circ}\text{C}$ |      |       |
|--------------|--------------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------|------|-------|
|              | $t$                                        | $p$   | $h$   | $t$                                        | $p$  | $h$   |
|              | $^{\circ}\text{C}$                         | MPa   | kJ/kg | $^{\circ}\text{C}$                         | MPa  | kJ/kg |
| 1            | 55,0                                       | 0,916 | 360,1 | 55,0                                       | 0,92 | 360,1 |
| 2s           | 40,5                                       | 0,528 | 352,9 | 29,7                                       | 0,33 | 346,6 |
| 2            | 49,5                                       | 0,528 | 354,3 | 32,8                                       | 0,33 | 349,3 |
| 3            | 30,0                                       | 0,528 | 343,4 | 15,0                                       | 0,33 | 334,0 |
| 4            | 30,0                                       | 0,528 | 234,6 | 15,0                                       | 0,33 | 217,0 |
| 5s           | 30,2                                       | 0,916 | 234,9 | 15,3                                       | 0,92 | 217,4 |
| 5            | 30,8                                       | 1,665 | 235,0 | 15,4                                       | 0,92 | 217,5 |
| 6            | 50,0                                       | 0,916 | 259,3 | 50,0                                       | 0,92 | 259,3 |
| 7            | 50,0                                       | 0,916 | 355,0 | 50,0                                       | 0,92 | 355,0 |
| 2r           | 35,0                                       | 0,528 | 347,9 | 20,0                                       | 0,33 | 338,3 |
| 5r           | 41,8                                       | 1,665 | 241,4 | 24,8                                       | 0,92 | 228,5 |

Tabela 3

Parametry pracy elektrociepłowni geotermalnej z obiegiem ORC

Table 3

Operating parameters the geothermal heat and power plant with ORC cycle

| Wariant | $t_{par}$ (wariant 1)<br>$t_{skr}$ (wariant 2) | $t_{g1}$     | $t_{g2}$    | $t_{g3}$    | $\dot{m}_n$ | NORC         | $N_{el}$      | $\dot{Q}_{cg}$ |
|---------|------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
|         |                                                | °C           | °C          | °C          | kg/s        | kW           | kW            | kW             |
| 1       | $t_{par} = 75^\circ\text{C}$                   | 100,0        | 65,6        | 45,0        | 26,7        | 287,4        | 281,7         | 3 271,7        |
|         |                                                | <b>100,0</b> | <b>68,9</b> | <b>45,0</b> | <b>26,7</b> | <b>287,4</b> | <b>281,65</b> | <b>3 624,1</b> |
|         | $t_{par} = 80^\circ\text{C}$                   | 100,0        | 72,0        | 45,0        | 21,4        | 250,5        | 245,5         | 3 952,9        |
|         |                                                | <b>100,0</b> | <b>74,9</b> | <b>45,0</b> | <b>21,4</b> | <b>250,5</b> | <b>245,45</b> | <b>4 256,9</b> |
|         | $t_{par} = 85^\circ\text{C}$                   | 100,0        | 79,5        | 45,0        | 15,5        | 193,6        | 189,7         | 4 752,3        |
|         |                                                | <b>100,0</b> | <b>81,7</b> | <b>45,0</b> | <b>15,5</b> | <b>193,6</b> | <b>189,73</b> | <b>4 985,2</b> |
|         | $t_{par} = 90^\circ\text{C}$                   | 100,0        | 84,0        | 45,0        | 12,0        | 159,1        | 155,9         | 5 226,1        |
|         |                                                | <b>100,0</b> | <b>85,7</b> | <b>45,0</b> | <b>12,0</b> | <b>159,1</b> | <b>155,90</b> | <b>5 413,2</b> |
| 2       | $t_{skr} = 30^\circ\text{C}$                   | 100,0        | 65,0        | 50,1        | 12,7        | 67,9         | 66,5          | 3 736,6        |
|         |                                                | <b>100,0</b> | <b>65,0</b> | <b>50,9</b> | <b>12,7</b> | <b>67,9</b>  | <b>66,53</b>  | <b>3 736,6</b> |
|         | $t_{skr} = 15^\circ\text{C}$                   | 100,0        | 65,0        | 48,0        | 12,7        | 128,9        | 126,3         | 3 736,6        |
|         |                                                | <b>100,0</b> | <b>65,0</b> | <b>49,3</b> | <b>12,7</b> | <b>128,9</b> | <b>126,32</b> | <b>3 736,6</b> |

Parametry zaznaczone kursywą dotyczą układu z regeneracją ciepła.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiona została wstępna analiza funkcjonowania elektrociepłowni zasilanej wodą termalną o temperaturze  $100^\circ\text{C}$ . Z uwagi na zmienne w czasie zapotrzebowanie na ciepło do celów grzewczych w pracy przedstawione zostały dwa warianty rozwiązań elektrociepłowni: wariant 1 (letni), wariant 2 (zimowy). Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w przypadku wariantu 1, w którym woda termalna w pierwszej kolejności przepływa przez wymiennik układu ORC, duży wpływ na moc elektryczną układu ma temperatura odparowania czynnika R227ea, która to z kolei ma wpływ na charakterystykę wymiennika ciepła. Spośród 4 rozpatrywanych temperatur odparowania największą moc uzyskano dla najniższej temperatury, tj.  $75^\circ\text{C}$ . W wariantcie tym woda termalna po ochłodzeniu się w wymienniku układu ORC kierowana była do wymiennika ciepła systemu ciepłowniczego. Temperatura wody termalnej dopływającej do tego wymiennika zależy również od temperatury odparowania czynnika R227ea. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że czym niższa temperatura odparowania tym niższa temperatura wody termalnej doprowadzanej do wymiennika ciepła. Fakt zmienności tej temperatury daje pewne możliwości regulacyjne. Można poprzez zmianę temperatury odparowania zmieniać temperaturę wody kierowanej do wymiennika ciepła systemu ciepłowniczego.

W wariantcie drugim woda termalna w pierwszej kolejności przepływa przez wymiennik ciepła systemu ciepłowniczego, z którego dalej doprowadzana jest do układu ORC. Takie rozwiązanie jest korzystne z uwagi na to, że w okresach zimowych wymagana jest znacznie wyższa temperatura nośnika ciepła w sieci ciepłowniczej. W tym wariantcie przyjęto, że temperatura wody powrotnej w sieci ciepłowniczej wynosi 60°C. Przy uwzględnieniu rozkładu temperatur w wymienniku ciepła okazuje się, że temperatura wody termalnej opuszczającej ten wymiennik wynosi 65°C. Taka temperatura wody pozwala na dalsze wykorzystanie zawartego w niej ciepła w układzie ORC. Ponieważ wariant drugi dotyczy okresu zimowego w pracy przeanalizowano również przypadek funkcjonowania elektrociepłowni przy niższej temperaturze skraplania. W wariantcie tym obliczenia wykonano przy obniżeniu temperatury skraplania z 30 do 15°C. Zabieg ten spowodował wzrost mocy układu ORC oraz obniżenie temperatury wody geotermalnej zatłaczanej do złoża.

W obu wariantach przeanalizowano również możliwość zastosowania w układzie wymiennika regeneracyjnego. Jak wykazały obliczenia zastosowanie tego wymiennika powoduje wzrost sprawności układu oraz wpływa na wzrost temperatury wody termalnej opuszczającej wymiennik układu ORC.

## LITERATURA

- BERENT-KOWALSKA G., KACPROWSKA J., MOSKAL I., JURGAŚ A., 2015 — Energia ze źródeł odnawialnych w 2014 r. Informacje i opracowania statystyczne. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- BORSUKIEWICZ-GOZDUR A., 2010 — Dual-fluid-hybrid power plant co-powered by low-temperature geothermal water. *Geothermics* 39, pp. 170–176.
- DIPPO R., 2005 — *Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies*. Wydawca Elsevier Advanced Technology.
- GÓRECKI W. i in., 2006 — *Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim*. Formacje Mezozoiku, Kraków.
- JAMIESON D.T., TUDHOPE J.S., MORRIS R., CARTWRIGHT G., 1969 — Physical properties of sea water solutions: heat capacity. *Desalination* 7, s. 23–30.
- KACZMARCZYK M., 2011 — Wykorzystanie energii geotermalnej do produkcji prądu elektrycznego z zastosowaniem obiegu organicznego Rankine’a lub Kaliny – przegląd instalacji działających na świecie. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój R.* 50, nr 1–2, s. 131–144.
- KĘPIŃSKA B., 2013 — Wykorzystanie energii geotermalnej w Polsce, 2012–2013. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój R.* 52, nr 1, s. 5–23.
- MAZUREK R., VALDIMARSSON P., 2011 — Wpływ temperatury wody geotermalnej o niskiej i średniej entalpii na pracę elektrowni z obiegiem Kaliny w warunkach polskich. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój R.* 50, nr 1–2, s. 177–186.
- MIECZNIK M., 2013 — Błąd szacowania potencjału dla wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach binarnych typu ORC związane z zmiennością parametrów termodynamicznych

wody geotermalnej. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2, s. 155–166.

SHARQAWY M.H., LIENHARD V.J.H., ZUBAIR S.M., 2010 — Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, s. 354–380.

WIŚNIEWSKI G. i in., 2007 — Możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce do roku 2020. Opracowanie wykonane na zlecenie Departamentu Energetyki Ministerstwa Gospodarki, Warszawa.

## ANALYSIS OF OPERATING A GEOTHERMAL HEAT AND POWER PLANT WITH THE ORC CYCLE

### ABSTRACT

This article presents a preliminary analysis of the operation of heat and power plants using geothermal resources in the conditions of the Polish Lowlands.

The paper assumes that a stream of geothermal water is  $\dot{V}_g = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ , the temperature at the outlet  $t_{g1} = 100^\circ\text{C}$ , mineralization of  $S = 120 \text{ g/kg}$ . The geothermal energy system consists of a geothermal doublet, which means that water is extracted one opening, and injected in the second. The paper analyzes two variants: variant 1 (summer), variant 2 (winter). In the variant 1 geothermal water is first directed to the ORC heat exchanger and then to the heating heat exchanger. In the second variant geothermal water flows through the heat exchanges and then is directed to the ORC. Calculations have shown that it is possible in both variants power generation in the ORC power plants while providing thermal energy. The presented solution also provides a possibility of changing the temperature of heat carrier in the district heating network by changing the evaporation temperature of the organic medium, the change variants or the use of a regenerative heat exchanger in the ORC circuit.

### KEY WORDS

Geothermal heat and power plant, ORC Power plant, organic working fluid, geothermal energy

