

# Cieplno-przepływowa analiza pracy elektrociepłowni geotermalnej opartej na obiegu ORC współpracującej z wymiennikiem typu Field

Thermal-flow analysis of the operation of a geothermal CHP power plant based on the ORC cycle cooperating with a Field-type exchanger

SŁAWOMIR WIŚNIEWSKI, TOMASZ KUJAWA

DOI 10.36119/15.2024.12.2

W artykule przedstawiono analizę pracy elektrociepłowni geotermalnej z niskotemperaturowym obiegiem ORC zasilanym energią geotermalną pozyskiwaną za pośrednictwem głębokiego geotermalnego wymiennika typu Field. W analizowanym układzie elektrociepłowni geotermalnej z niskowrzącym obiegiem ORC ciepło na cele centralnego ogrzewania może być pozyskiwane z pary opuszczającej turbinę układu ORC lub bezpośrednio z wymiennika typu Field. Jak wykazała przeprowadzona analiza takie rozwiązanie umożliwia znaczną regulację strumienia ciepła na potrzeby ogrzewcze, poprzez zmianę zarówno strumienia masowego czynnika grzewczego, jak i jego temperatury. Proponowane rozwiązanie daje również możliwość funkcjonowania układu jako ciepłownia (tylko cele grzewcze), a w przypadku braku zapotrzebowania ciepła na cele ogrzewcze, jako elektrownia (tylko energia elektryczna). Takie podejście zwiększa elastyczność proponowanego rozwiązania i pozwala na lepsze wykorzystanie zasobów energii geotermalnej pozyskiwanej za pomocą wymiennika typu Field. W analizie układu elektrociepłowni geotermalnej uwzględniono zmienność parametrów pracy samego układu ORC dla trzech różnych czynników roboczych (R1234ze, R1234yf i R227ea) oraz zmienną charakterystykę wymiennika geotermalnego (zmiana strumienia wody).  
Słowa kluczowe: energia geotermalna, elektrociepłownia geotermalna, obieg ORC, czynnik niskowrzący, wymiennik typu Field

The article presents an analysis of the operation of a geothermal CHP plant with a low-temperature ORC circuit powered by geothermal energy obtained via a deep geothermal Field exchanger. In the analyzed geothermal CHP plant system with a low-boiling ORC circuit, heat for central heating purposes can be obtained from steam leaving the ORC system turbine or directly from the Field exchanger. As the analysis shows, such a solution allows for significant regulation of the heat flux for heating purposes, by changing both the mass flow rate of the heating medium and its temperature. The proposed solution also allows the system to function as a heating plant (only for heating purposes), and in the absence of heat demand for heating purposes, as a power plant (only electricity). This approach increases the flexibility of the proposed solution and allows for better use of geothermal energy resources obtained using a Field exchanger. In the analysis of the geothermal power plant system, the variability of the operating parameters of the ORC system itself for three different working fluids (R1234ze, R1234yf and R227ea) and the variable characteristics of the Field heat exchanger (change of the water flow) were taken into account.  
Keywords: geothermal energy, geothermal combined heat and power plant, ORC cycle, low-boiling medium, Field-type exchanger

## Wykaz oznaczeń:

		$K$	zredukowany współczynnik	$\dot{V}$	objętościowy strumień
			przenikania ciepła,	$W/K$	czynnika,
		$L$	współrzędna długości,	$X$	$m^3/h$
$a, b$	stałe,	–	głębokości,	$m$	–
$C_1^*, C_2^*$	stałe całkowania,	–	strumień masy,	$\dot{W}$	pojemność cieplna strumienia, $W/K$
$c_p^1$	średnie ciepło właściwe,	$J/(kg \cdot K)$	$\dot{m}$	$kg/s$	$\lambda$
$D, d$	średnica,	$m$	$N$	$kW$	współczynnik przewodzenia
$E$	stała,	$^{\circ}C/m$	$p, q$	–	ciepła,
$E^*$	stała,	$^{\circ}C$	$Q$	$v^2$	$W/(m \cdot K)$
$h$	entalpia właściwa,	$kJ/kg$	$s$	–	–
$k$	współczynnik przenikania	$W/(m^2 \cdot K)$	$T$	$kJ/s$	–
	ciepła,		$T_x$	$kJ/(kg \cdot K)$	$\eta$
			temperatura,	$^{\circ}C$	–
			temperatura gruntu,	$^{\circ}C$	$\Theta$
				$^{\circ}C$	różnica temperatury,
				$\Delta T$	$K$
					różnica temperatury ( $T_2 - T_1$ ),
					$K$

dr inż. Sławomir Wiśniewski: <https://orcid.org/0000-0001-5780-5027>, dr inż. Tomasz Kujawa: <https://orcid.org/0000-0001-8168-1167> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Katedra Technologii Energetycznych, Szczecin, Autor do korespondencji: e-mail: slawomir.wisniewski@zut.edu.pl, e-mail: tomasz.kujawa@zut.edu.pl

## Wprowadzenie

Obecnie w sektorze energetycznym widoczny jest trend polegający na tworzeniu tak zwanych spółdzielni energetycznych, czyli samowystarczalnych energetycznie regionów (np. gmin, miast lub wiosek) wykorzystujących alternatywne i odnawialne źródła energii. Działania takie doskonale wpisują się w propozycje nakreślone w ramach Europejskiego „Zielonego Ładu” (Green Deal). Biorąc po uwagę powyższe w niniejszym referacie zaproponowano wykorzystanie energii geotermalnej pozyskiwanej za pomocą geotermalnego wymiennika ciepła typu Field do zasilania elektrociepłowni z organicznym obiegiem Clausiusa-Rankine’a (obiegami ORC).

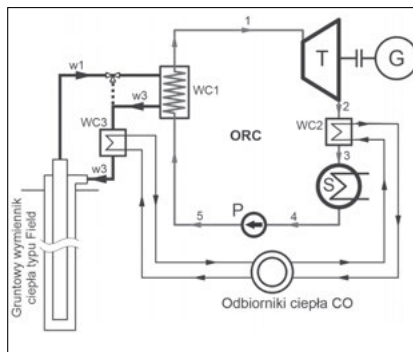
Uzasadnieniem podjęcia tej tematyki jest fakt dostępności energii geotermalnej w całym okresie eksploatacji instalacji, niezależnie od warunków pogodowych, tak jak ma to miejsce w przypadku energii słonecznej lub wiatrowej. Czyli można powiedzieć, że system energetyczny oparty na źródle energii geotermalnej, przy odpowiednio dobranych parametrach jest systemem pewnym. Biorąc to pod uwagę w analizowanym układzie, ze względu na tę dyspozycyjność źródła ciepła, nie ma konieczności magazynowania energii. Dodatkowo należy wspomnieć, że w Polsce istnieje kilka tysięcy niewykorzystywanych otworów będących pozostałościami po poszukiwaniach ropy i gazu (w skali świata szacuje się, że nawet do 20-30 mln. otworów [1, 2]), które po przeprowadzeniu prac rekonstrukcyjnych można wykorzystać do tego typu układów.

Celowość wprowadzenia układu ORC wynika ze zmienności zapotrzebowania ciepła na cele grzewcze, co oznacza, że w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na ciepło pozostają nadwyżki ciepła, które można wykorzystać do generacji energii elektrycznej. Z uwagi na zakres temperaturowy wody pozyskiwanej z wymiennika typu Field możliwość generacji energii elektrycznej dają niskotemperaturowe układy ORC. Zastosowanie tych układów nie ogranicza się jedynie do zasobów geotermalnych. Układy te można wykorzystać do generacji energii elektrycznej z wykorzystaniem strumieni energii odpadowych [3], biomasy [4], czy też regazyfikacji LNG [5].

Możliwość generacji energii elektrycznej w układach ORC z wykorzystaniem niskotemperaturowych źródeł ciepła umożliwiają odpowiednie, niskowrzące czynniki obiegowe (takie, jakie wykorzystywane są w układach klimatyzacji).

## Opis układu

Analizowany układ elektrociepłowni z obiegiem ORC współpracującym z wymiennikiem Field schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Jak wynika z przedstawionego schematu woda podgrzana w tym wymienniku kierowana jest do wymiennika ciepła układu ORC, w którym następuje podgrzanie, odparowanie i przegrzanie czynnika obiegowego. Czynnik obiegowy po rozprężeniu w turbinie transportowany jest do wymiennika ciepła WC2, w którym podgrzewana jest woda sieciowa z systemu grzewczego. W przypadku, gdy temperatura wody opuszczającej wymiennik ciepła WC1 układu ORC jest wyższa od temperatury wody powrotnej z systemu ciepłowniczego można wstępnie podgrzewać wodę powrotną w wymienniku WC3. W układzie, jeżeli zachodzi taka konieczność, istnieje możliwość wykorzystania ciepła pozyskiwanego w wymienniku Field tylko na cele ciepłownicze, z pominięciem układu ORC. W takim przypadku woda kierowana jest bezpośrednio do wymiennika ciepła WC3.

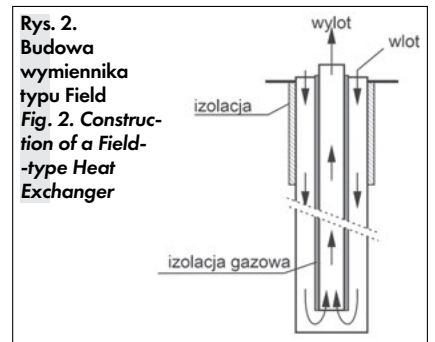


Rys. 1. Poglądowy schemat elektrociepłowni geotermalnej współpracującej z geotermicznym wymiennikiem typu Field  
Fig. 1. Schematic diagram of a geothermal combined heat and power plant cooperating geothermal Field exchanger

### Geotermalny wymiennik ciepła typu Field

Najczęściej spotykanym w literaturze tematu rozwiązaniem pozwalającym na wykorzystanie istniejących odwiertów jest uzbrojenie takiego otworu w dwie rury o różnych średnicach tak, aby utworzyły wymiennik typu rura w rurze, nazywanym również wymiennikiem typu Field i dzięki czynnikiowi pośredniczemu, odbierającemu ciepło z formacji skalnej, możliwe było pozyskanie energii [6]. Płyn (najczęściej woda lub czynnik o niskiej temperaturze wrzenia) wprowadzany do przestrzeni pierścieniowej utworzonej przez dwie rury, ogrzewa się na całej długości otworu, po czym na końcu wymiennika (tzw. punkt

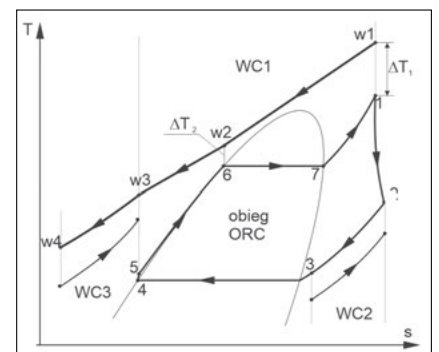
zwrotny) kierowany jest do wewnętrznej rury i przepływa do głowicy odwiertu. Idealnym rozwiązaniem pracy takiego wymiennika byłaby sytuacja, gdyby temperatura czynnika na wypływie z wymiennika była równa tej, którą czynnik osiąga w punkcie zwrotnym, czyli przy doskonałym zaizolowaniu rury wewnętrznej. W praktyce doskonałej izolacyjności nie uzyskamy, jedynie możemy zbliżyć się do ideału poprzez zastosowanie np. gazów/izolatorów, które wypełniać będą przestrzeń pomiędzy rurą wewnętrzną i dodatkową rurą, która stanowić będzie płaszcz izolacyjny (rys.2). Tak pozyskany strumień ciepły może być wykorzystany na potrzeby c.o., c.w., celów technologicznych, jak również do produkcji energii elektrycznej przy pomocy układów ORC [6].



Rys. 2. Budowa wymiennika typu Field  
Fig. 2. Construction of a Field-type Heat Exchanger

### Obieg ORC z wymiennikiem ciepłowniczym

Analizowany układ ORC (rys. 1) pracuje według podkrzytycznego obiegu Clausiusa-Rankine’a na parę przegrzaną. Temperatura przegrzewu skorelowana jest z temperaturą wody doprowadzanej z wymiennika typu Field. Przyjęto, że różnice temperatur pomiędzy wodą a czynnikiem obiegowym układu ORC wynoszą odpowiednio:  $\Delta T_1 = 10\text{K}$  i  $\Delta T_2 = 5\text{K}$  (rys. 3).



Rys. 3. Wykres przemian termodynamicznych w obiegu ORC w układzie T-s wraz z poglądowym rozkładem temperatur w wymiennikach WC1, WC2 i WC3  
Fig. 3. Diagram of thermodynamic transformations in the ORC circuit in T-s system along with an illustrative temperature distribution in WC1, WC2 and WC3 exchangers

Na rysunku 3 przedstawiono wykres przemian termodynamicznych czynnika w obiegu ORC oraz rozkłady temperatur w wymiennikach ciepła WC1, WC2 oraz WC3.

Z uwagi na to, że zastosowane czynniki obiegowe zaliczane są do grupy czynników suchych, para opuszczająca turbinę układu ORC jest parą przegrzaną o temperaturze wyższej od temperatury skraplania, którą w niniejszej analizie przyjęto na poziomie  $t_{skr} = 35^\circ\text{C}$ . To pozwala na zastosowanie za turbiną układu ORC wymiennika ciepła WC2. Zastosowanie tego wymiennika sprawia, że ciepło zawarte w parze za turbiną wykorzystywane jest w sposób użyteczny na cele ciepłownicze. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest to, że zmniejsza się strumień ciepła wprowadzanego w skraplaczu.

W tym miejscu należy podkreślić, że wymiennik ciepła WC2 może być również wykorzystany jako wymiennik umożliwiający przeprowadzenie wewnętrznej wymiany ciepła w układzie ORC. Rozwiązanie to polega na tym, że para czynnika roboczego opuszczająca turbinę układu ORC wstępnie podgrzewa czynnik opuszczający skraplacz. Rozwiązanie to powoduje wzrost sprawności układu ORC i może być wykorzystane w przypadku pracy układu przedstawionego na rys. 1 jako klasyczna elektrownia, co oznacza, że energia geotermalna konwertowana jest jedynie na energię elektryczną. Przykładową analizę pracy układu ORC z wykorzystaniem wewnętrznej regeneracji ciepła można znaleźć między innymi w pracy [7].

## Metodyka obliczeń

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe zależności wykorzystane w analizie z podziałem na gruntowy wymiennik ciepła typu Field oraz na układ ORC.

### Wymiennik typu Field

Metodyka obliczeń wymiennika typu Field została szczegółowo zaprezentowana w wielu pracach, m.in. [8-10], stąd zdecydowano się przedstawić tylko wybrane końcowe zależności. Wykorzystując bilansowanie wymiennika ciepła – rys. 4. – (odniesione do elementarnej powierzchni kanału wewnętrznego i zewnętrznego), dokonując szeregu przekształceń oraz wykorzystując metodę d’Alamberta [11] doprowadzono do uzyskania układu równań, który opisuje rozkład temperatur czynnika przepływającego w rozpatrywanym wymienniku:

$$\Theta_1 = -C_2^* \exp(v_2^2 X) + C_1^* \exp(v_1^2 X), \quad (1)$$

$$\Theta_2 = C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(v_2^2 X) -$$

$$-C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2 X) + \frac{E^*}{a}. \quad (2)$$

gdzie:

$$v_i^2 = 0,5(K_z/W) [-1 \pm \sqrt{1+4(K_w/K_z)}],$$

$$(q_i/p_i) = -(v_i^2 + b)/a \text{ dla } i = 1, 2;$$

$$a = K_w/\dot{W}, \quad b = (K_w + K_z)/\dot{W},$$

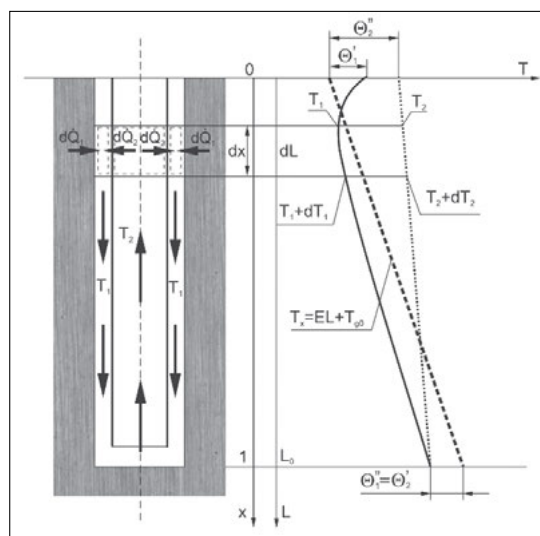
$$T_x = EL_o L/L_o + T_{g0} = E^* X + T_{g0}, \quad L/L_o = X,$$

$$K_w = k_w \pi D_2 L_o, \quad K_z = k_z \pi D_1 L_o,$$

$$\Theta_1 = T_1 - T_x, \quad \dot{W} = \dot{m} c_p.$$

Rys. 4.

Przyjęty w opracowaniu model wymiennika typu Field z rozkładem temperatury  
Fig. 4. Field exchanger model with temperature distribution adopted in the study



Dla jednoznacznego opisu rozkładu temperatury w wymienniku należy wyznaczyć dwie stałe całkowania ( $C_1^*$ ,  $C_2^*$ ), które po wykorzystaniu warunków brzegowych (3) i (4), przyjmą postać (5):

$$\text{jeżeli } X = 0 \text{ to } \Theta_1 = \Theta_1', \quad (3)$$

$$\text{jeżeli } X = 1 \text{ to } \Theta_2 = \Theta_2'', \quad (4)$$

$$C_1^* =$$

$$\Theta_1' \exp(v_2^2) \left[ \frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \frac{E^*}{a} = \frac{\exp(v_2^2) \left[ \frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(v_1^2) \left[ \frac{q_1}{p_1} + 1 \right]}{\exp(v_2^2) \left[ \frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(v_1^2) \left[ \frac{q_1}{p_1} + 1 \right]},$$

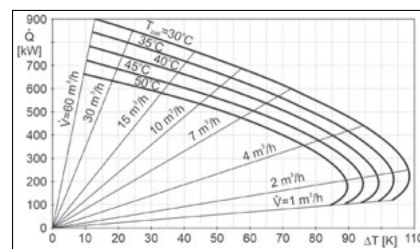
$$C_2^* =$$

$$\Theta_1' \exp(v_1^2) \left[ \frac{q_1}{p_1} + 1 \right] - \frac{E^*}{a} = \frac{\Theta_1' \exp(v_1^2) \left[ \frac{q_1}{p_1} + 1 \right] - \frac{E^*}{a}}{\exp(v_2^2) \left[ \frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(v_1^2) \left[ \frac{q_1}{p_1} + 1 \right]}. \quad (5)$$

Obliczenia prowadzono dla kilku temperatur zatlaczania wody do wymiennika, strumienia przepływu wody ( $1-60 \text{ m}^3/\text{h}$ ), długości wymiennika 5000 m. Do obliczeń przyjęto, że temperatura gruntu zmienia się liniowo, przy czym na głębokości maksymalnej wymiennika wynosi  $188^\circ\text{C}$ , zaś na powierzchni gruntu  $18^\circ\text{C}$ .

Wyniki obliczeń zaprezentowane na rys.5 dotyczą wariantu ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 240 dni – współczynnik przenikania ciepła rury zewnętrznej  $k_z = 3,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , natomiast współczynnik przenikania ciepła rury wewnętrznej  $k_w$  wynosił  $0,90 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  – rura wewnętrzna izolowana warstwą powietrza.

Obliczenia współczynników przekazywania ciepła „wymiennik ciepła typu Field – grunt” obliczono zgodnie z zasadami teorii wymiany ciepła, przyjmując quasi-ustaloną wymianę ciepła dla gruntu, w którym spoczywa wymiennik. Szczegó-



Rys. 5.

Możliwy do pozyskania strumień energii geotermalnej w wymienniku Field (głębokość 5000 m)  
Fig. 5. Possibilities of obtaining geothermal heat from a Field exchanger of 5000 m

ły opis metodyki obliczeniowej tych współczynników znajduje się w rozdziale 3 monografii [8].

### Obieg ORC

W obliczeniach dotyczących układu ORC wykorzystano podstawowe zależności stosowane w analizie termodynamicznej obiegu Clausiusa-Rankine’a prezentowane między innymi w pracy [12].

Punktem wyjścia do obliczeń obiegu ORC była charakterystyka wymiennika typu Field. Po określeniu strumienia wody i temperatur uzyskiwanych w tym wymienniku wyznaczono parametry termiczne i kaloryczne w charakterystycznych punktach obiegu ORC. Parametry takie jak

entalpia właściwa, entropia właściwa, ciśnienie i temperatura czynnika obiegowego zostały wyznaczone za pomocą bazy RefPROP 9.0 [13].

Obliczenia ciepłno-przepływowe wymienników ciepła WC1, WC2 i WC3 przeprowadzono przy pominięciu strat ciepła do otoczenia. Sprawność wewnętrzna pompy obiegowej i turbiny układu ORC przyjęto na poziomie 0,8.

W celu określenia parametrów pracy elektrociepłowni ORC należy wyznaczyć strumień masowy czynnika roboczego w obiegu ORC. Strumień ten wyznaczono z równania bilansu energii części wymiennika ciepła WC1 obejmującej strefę odparowania i przegrzania. Przy pominięciu strat ciepła do otoczenia równanie to przyjmuje postać:

$$\dot{m}_w c_w (t_{w1} - t_{w2}) = \dot{m}_{ORC} (h_1 - h_5) \quad (6)$$

Strumień masowy czynnika w obiegu ORC wyznaczony z przekształconej zależności (1a):

$$\dot{m}_{ORC} = \frac{\dot{m}_w (h_{w1} - h_{w2})}{h_1 - h_5} \quad (7)$$

Równanie bilansu całego wymiennika ciepła WC1 przyjmuje postać:

$$\dot{Q}_{WC1} = \dot{m}_w c_w (t_{w1} - t_{w3}) = \dot{m}_{ORC} (h_1 - h_{4s}) \quad (8)$$

Temperaturę wody opuszczającej wymiennik ciepła WC1 wyznaczono przekształcając zależność (8):

$$t_{w3} = t_{w1} - \frac{\dot{m}_{ORC} (h_1 - h_{4s})}{\dot{m}_w c_w} \quad (9)$$

Moc turbiny określono na podstawie parametrów termicznych czynnika roboczego obiegu ORC i po uwzględnieniu sprawności turbiny:

$$N_T = \dot{m}_{ORC} (h_1 - h_{2s}) \eta_T \quad (10)$$

Moc potrzebną do napędu pompy określono na podstawie parametrów termicznych czynnika roboczego obiegu ORC i po uwzględnieniu sprawności pompy:

$$N_P = \dot{m}_{ORC} (h_{5s} - h_4) \frac{1}{\eta_P} \quad (11)$$

Moc obiegu ORC określono z następującej zależności:

$$N_{ORC} = N_T - N_P \quad (12)$$

Moc cieplną wymiennika WC2 na cele ciepłownicze określono z zależności:

$$\dot{Q}_{WC2} = \dot{m}_{ORC} (h_2 - h_3) \quad (13)$$

Moc cieplną wymiennika WC3 na cele ciepłownicze określono z zależności:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{WC3} &= \dot{m}_w c_w (t_{w3} - t_{w4}) = \\ &= \dot{m}_w (h_{w3} - h_{w4}) \end{aligned} \quad (14)$$

Całkowitą moc cieplną na cele ciepłownicze określono z zależności:

$$\dot{Q}_{CO} = \dot{Q}_{WC2} + \dot{Q}_{WC3} \quad (15)$$

## Wyniki obliczeń

W analizie uwzględniono, że ciepłownia zasila również systemy ogrzewania niskotemperaturowego, przez co temperatura wody załączanej do wymiennika gruntowego wynosi 40°C. Maksymalną temperaturę wody na wypływanie z wymiennika typu Field uzyskuje się dla strumienia wody wynoszącego około 1,8 m<sup>3</sup>/h (0,5 kg/s).

Analizę pracy układu ORC przeprowadzono dla strumienia wody przetłaczanego przez wymiennik geotermalny wynoszącego odpowiednio: 0,5; 1; 2; 5 i 10 kg/s (1,8; 3,6; 7,2; 18 i 36 m<sup>3</sup>/h).

Dla analizowanych strumieni temperatura wody doprowadzanej do wymiennika ciepła WC1 układu ORC wynosi odpowiednio: 139,1; 128,3; 104,1; 72,9 i 57,9°C. Oznacza to, że wraz ze wzrostem strumienia wody przetłaczanego przez wymiennik geotermalny spada jej temperatura. Zmienność tej temperatury przekłada się na zmianę parametrów, w których realizowany jest obieg ORC.

Śród analizowanych czynników (R1234ze, R1234yf i R227ea) najwyższą moc obiegu ORC uzyskano dla czynnika R1234yf przy strumieniu wody wynoszącym 1 kg/s. Uzyskana moc wynosiła N = 28,7 kW przy temperaturze parowania t<sub>par</sub> = 92°C. Dla tych parametrów sumaryczna moc cieplna wymienników WC1 i WC2 równa była 119 kW.

Dla czynnika R227ea najwyższe moce obiegu ORC otrzymano przy strumieniu wody przepływającej przez wymiennik typu Field wynoszącym 1 kg/s. Uzyskana moc wynosiła N = 27,8 kW przy temperaturze parowania t<sub>par</sub> = 99°C. Dla tych parametrów sumaryczna moc cieplna wymienników WC1 i WC2 wynosiła 140 kW.

Natomiast dla czynnika R1234ze maksymalna uzyskana moc obiegu ORC wynosiła N = 26,6 kW przy temperaturze parowania t<sub>par</sub> = 73°C oraz przy strumieniu wody przepływającej przez wymiennik typu Field wynoszącym 2 kg/s. Dla tych parametrów sumaryczna moc cieplna wymienników WC1 i WC2 równa była 223 kW.

W obliczeniach uwzględniono także wpływ temperatury parowania czynnika obiegowego w układzie ORC na parametry pracy analizowanej elektrociepłowni. Na podstawie analizy uzyskanych wyników obliczeń można stwierdzić, że dla małych strumieni wody 0,5 i 1 kg/s wraz ze wzrostem temperatury odparowania rośnie moc obiegu ORC, natomiast spada moc cieplna. Inna relacja jest w przypadku, gdy strumień wody przetłaczanej przez wymiennik typu Field wynosił odpowiednio 2, 5 i 10 kg/s. Dla tych wartości strumienia wzrost temperatury parowania przekłada się na wzrost mocy cieplnej, natomiast moc obiegu ORC przy wzroście temperatury parowania początkowo rośnie do wartości maksymalnej, po czym zaczyna spadać (czyli dla danych warunków można wyznaczyć optymalną temperaturę odparowania z punktu widzenia mocy układu ORC).

Temperatura odparowania znacząco wpływa również na temperatury nośników ciepła osiągnięte w wymiennikach WC2 i WC3. Obliczenia wykazały, że wraz ze wzrostem temperatury odparowania zmniejsza się temperatura pary za turbiną t<sub>2</sub> w wymienniku WC2, a wzrasta temperatura wody na dopływie do wymiennika WC3.

Przykładowo dla czynnika R1234yf (m<sub>w</sub> = 2 kg/s) wzrost temperatury parowania z 55°C do 75°C powoduje spadek temperatury pary za turbiną z 63°C do 42°C oraz wzrost temperatury wody przed wymiennikiem WC2 z 48°C do około 66°C. Zmienność tej temperatury przekłada się także na zmianę sumarycznej mocy wymienników ciepłowniczych WC1 i WC2 w granicach od 179 kW (dla t<sub>par</sub> = 55°C) do 339 kW (dla t<sub>par</sub> = 75°C). Stąd nasuwa się wniosek, że poprzez zmianę temperatury parowania można prowadzić regulację temperatury czynnika grzewczego, a tym samym regulację strumienia ciepła ciepłowniczego. Moc obiegu ORC w zakresie zmienności temperatury parowania waha się w granicach 20,5–24,3 kW, przy czym maksymalną wartość uzyskano dla t<sub>par</sub> = 64°C.

Przykładowe wyniki obliczeń dla elektrociepłowni ORC z czynnikiem R1234yf przedstawiono w tabelach 1-3. Analiza układu elektrociepłowni przy strumieniu wody wynoszącym 10 kg/s wykazała, że temperatury czynników doprowadzanych do wymienników WC1 i WC2 (para przegrzana z za turbiny i woda) wynoszą około 42°C, co umożliwia wykorzystanie tego ciepła do celów ciepłowniczych. Przy tych parametrach układu moc obiegu ORC dla czynnika R1234yf wynosi około 13 kW.

**Tabela 1. Przykładowe wyniki analizy dla elektrociepłowni ORC z czynnikiem R1234yf (dla strumienia wody  $m_w=1$  kg/s)**

Temperatura parowania	Temperatura pary na zasilaniu wymiennika WC2	Temperatura wody na zasilaniu wymiennika WC3	Moc obiegu ORC	Moc cieplna wymienników ciepłowniczych		
$t_{par}$ °C	$t_2$ °C	$t_{w3}$ °C	$N_{ORC}$ kW	$\dot{Q}_{WC2}$ kW	$\dot{Q}_{WC3}$ kW	$\dot{Q}_{CO}$ kW
92,0	72,9	55,3	28,7	55,8	64,0	119,8
91,0	74,0	56,0	28,2	56,9	66,7	123,6
90,0	75,1	56,3	27,7	58,1	68,2	126,3
89,0	76,2	56,5	27,4	59,3	69,0	128,3
88,0	77,2	56,5	27,0	60,7	69,2	129,8
87,0	78,2	56,5	26,7	62,1	68,9	131,0
86,0	79,2	56,4	26,4	63,5	68,4	131,9
85,0	80,2	56,2	26,2	64,9	67,6	132,5
84,0	81,1	55,9	25,9	66,4	66,6	133,0
83,0	82,0	55,7	25,6	67,9	65,5	133,4
82,0	83,0	55,4	25,3	69,3	64,2	133,6
81,0	83,9	55,0	25,1	70,8	62,9	133,7
80,0	84,8	54,7	24,8	72,3	61,4	133,8
79,0	85,6	54,3	24,5	73,9	59,9	133,7
78,0	86,5	53,9	24,2	75,4	58,3	133,7
77,0	87,3	53,6	23,9	76,9	56,6	133,5
76,0	88,2	53,1	23,6	78,4	54,9	133,4
75,0	89,0	52,7	23,3	80,0	53,2	133,2
74,0	89,8	52,3	23,0	81,5	51,4	133,0
73,0	90,7	51,9	22,7	83,1	49,6	132,7
72,0	91,5	51,4	22,3	84,6	47,8	132,5
71,0	92,3	51,0	22,0	86,2	46,0	132,2
70,0	93,0	50,6	21,6	87,8	44,1	131,9

**Tabela 2. Przykładowe wyniki analizy dla elektrociepłowni ORC z czynnikiem R1234yf (dla strumienia wody  $m_w=2$  kg/s)**

Temperatura parowania	Temperatura pary na zasilaniu wymiennika WC2	Temperatura wody na zasilaniu wymiennika WC3	Moc obiegu ORC	Moc cieplna wymienników ciepłowniczych		
$t_{par}$ °C	$t_2$ °C	$t_{w3}$ °C	$N_{ORC}$ kW	$\dot{Q}_{WC2}$ kW	$\dot{Q}_{WC3}$ kW	$\dot{Q}_{CO}$ kW
75,0	42,1	66,2	20,5	4,2	334,9	339,1
74,0	43,5	65,1	21,2	7,3	321,1	328,4
73,0	44,8	64,1	21,8	10,5	307,6	318,1
72,0	46,1	63,0	22,3	13,7	294,4	308,1
71,0	47,4	62,0	22,8	16,9	281,5	298,4
70,0	48,5	61,0	23,2	20,2	268,9	289,1
69,0	49,7	60,1	23,5	23,5	256,6	280,1
68,0	50,8	59,1	23,8	26,8	244,5	271,3
67,0	51,8	58,2	24,0	30,2	232,7	262,9
66,0	52,9	57,3	24,2	33,6	221,1	254,7
65,0	53,9	56,4	24,3	37,0	209,7	246,7
64,0	54,9	55,5	24,3	40,5	198,5	239,0
63,0	55,8	54,7	24,2	44,0	187,5	231,5
62,0	56,8	53,8	24,1	47,6	176,7	224,3
61,0	57,7	53,0	24,0	51,2	166,1	217,2
60,0	58,6	52,2	23,8	54,8	155,6	210,4
59,0	59,5	51,4	23,5	58,4	145,3	203,7
58,0	60,4	50,6	23,2	62,1	135,2	197,3
57,0	61,2	49,8	22,8	65,8	125,2	191,0
56,0	62,1	49,0	22,3	69,5	115,4	184,9
55,0	62,9	48,3	21,8	73,2	105,7	179,0

Z tego względu, przy strumieniu 10 kg/s, korzystniejszym rozwiązaniem jest bezpośrednio wykorzystanie pozyskanego ciepła geotermicznego na cele ciepłownicze (temperatura wody na wypływie z wymiennika geotermalnego wynosi 57,9°C).

W tabeli 4 przedstawiono zestawienie zakresu uzyskanych z obliczeń parametrów pracy dla elektrociepłowni geotermalnej dla różnych strumieni wody przepływającej przez wymiennik typu Field oraz dla różnych czynników roboczych w obiegu ORC.

**Tabela 3. Przykładowe wyniki analizy dla elektrociepłowni ORC z czynnikiem R1234yf (dla strumienia wody  $m_w=5$  kg/s)**

Temperatura parowania	Temperatura pary na zasilaniu wymiennika WC2	Temperatura wody na zasilaniu wymiennika WC3	Moc obiegu ORC	Moc cieplna wymienników ciepłowniczych		
				$\dot{Q}_{WC2}$	$\dot{Q}_{WC3}$	$\dot{Q}_{CO}$
$t_{par}$ °C	$t_2$ °C	$t_{w3}$ °C	$N_{ORC}$ kW	kW	kW	kW
60,0	41,2	55,8	18,3	3,2	330,6	333,8
59,0	42,3	54,8	18,8	6,3	308,9	315,2
58,0	43,3	53,8	19,2	9,7	287,7	297,3
57,0	44,4	52,8	19,5	13,2	267,0	280,1
56,0	45,4	51,8	19,7	16,8	246,7	263,5
55,0	46,3	50,9	19,7	20,6	226,9	247,5
54,0	47,3	49,9	19,7	24,6	207,4	232,0
53,0	48,2	49,0	19,5	28,6	188,4	217,0
52,0	49,1	48,1	19,3	32,8	169,7	202,5
51,0	50,0	47,2	18,9	37,1	151,4	188,5
50,0	50,9	46,4	18,5	41,5	133,4	174,9
49,0	51,8	45,5	17,9	46,0	115,7	161,7
48,0	52,6	44,7	17,3	50,6	98,4	149,0
47,0	53,4	43,9	16,5	55,3	81,3	136,6
46,0	54,3	43,1	15,7	60,1	64,5	124,6
45,0	55,1	42,3	14,8	65,0	48,0	113,0

**Tabela 4. Porównanie parametrów pracy układu elektrociepłowni geotermalnej dla różnych czynników roboczych**

Czynnik roboczy obiegu ORC	Strumień masowy wody przepływającej przez wymiennik typu Field	Temperatura parowania	Moc obiegu ORC	Moc cieplna
	$\dot{m}_w$	$t_{par}$	$N_{ORC}$	$\dot{Q}_{CO}$
	kg/s	°C	kW	kW
R1234yf	1	73 – 93	22,3 – 28,7	119 – 132
	2	55 – 75	20,5 – 24,3	179 – 339
	5	45 – 60	14,8 – 19,7	113 – 334
R227ea	1	75 – 99	21,9 – 27,8	140 – 151
	2	60 – 93	21,3 – 26,5	183 – 310
	5	45 – 62	14,5 – 19,6	121 – 361
R1234ze	1	74 – 107	22,8 – 26,0	131 – 151
	2	60 – 92	18,8 – 26,4	165 – 340
	5	45 – 61	14,9 – 19,6	108 – 351

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na zasadność zastosowania w układzie elektrociepłowni geotermalnej czynnika R1234yf z punktu widzenia mocy układu ORC. Natomiast, biorąc pod uwagę uzyskiwaną moc cieplną, korzystniej wypada

użycie czynnika R1234ze. Przy czym trzeba tu zaznaczyć, że różnice w uzyskiwanych parametrach są nieznaczne.

Biorąc pod uwagę aspekty środowiskowe, a konkretnie wpływ czynnika na ocieplanie klimatu, najkorzystniejszym wyborem jest czynnik R1234yf, dla którego wartość wskaźnika GWP wynosi 4, co oznacza niski potencjał cieplarniany (dla czynnika R1234ze GWP=7, a dla R227ea GWP=3220).

## Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że istnieje możliwość wykorzystania pozyskiwanej energii geotermalnej za pomocą wymiennika typu Field do zasilania elektrociepłowni z obiegiem ORC. Zastosowanie tego rozwiązania jest możliwe przy znacznej zmienności strumienia wody przepływającej przez wymiennik geotermalny. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że zwiększenie strumienia wody wpływa na spadek jej temperatury na wypływie z wymiennika typu Field, co w konsekwencji znacząco wpływa na funkcjonowanie elektrociepłowni. Analiza

wykazała również, że istnieje możliwość znacznej regulacji parametrów nośnika ciepła w systemie ciepłowniczym poprzez zmianę strumienia wody przetłaczanej przez wymiennik geotermalny oraz poprzez zmianę temperatury parowania czynnika roboczego w obiegu ORC.

## REFERENCES

- [1] Kotler S., Abandoned oil and gas wells are leaking. <<http://www.zcommunications.org/abandoned-oil-and-gas-wells-are-leaking-by-STEVENKOTLER>>; 2011
- [2] Templeton J.D., Ghoreishi-Madiseh S.A., Hasani F., Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy, *Energy* 70; 366–373, 2014
- [3] Musiał A., Kalina J.: Wykorzystanie przemysłowej energii odpadowej do produkcji energii elektrycznej w układach ORC. INSTAL 5/2019
- [4] Świerzewski M., Kalina J.: Optymalizacja doboru mocy elektrociepłowni biomasowej z modulem ORC w projekcie modernizacji ciepłowni komunalnej z kotłami węglowymi typu WR 12/2019 Instal s. 14-8; DOI 10.36119/15.2019.12.1
- [5] Kaczmarek Radomir, Stachel Aleksander A. (2015). Zastosowanie siłowni ORC w instalacji regazyfikacji LNG. Instal nr 2/2015, str. 19 – 23
- [6] Imran M., Usman M., Park B.S., Yang Y., Comparative assessment of Organic Rankine Cycle

integration for low temperature geothermal heat source applications, *Energy*, 102, (2016), 473-490

- [7] Wiśniewski, S., Borsukiewicz-Gozdur, A., The influence of vapor superheating on the level of heat regeneration in a subcritical ORC coupled with gas power plant. *Archives of Thermodynamics*, 31 (2010), nr 3, s. 185–199
- [8] Kujawa T., Modelowanie geotermalnych wymienników ciepła typu Field – pozyskiwanie ciepła geotermalnego, Wyd. Uczelniane ZUT w Szczecinie, Szczecin 2019
- [9] Kujawa T., Nowak W., Influence of the geothermal heat exchanger length (in single bore-hole acquisition system) on its characteristics, *Archives of Thermodynamics* 26 (2): 17–27, 2005
- [10] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., Heat-flow characteristics of one-hole and two-hole systems for winning geothermal heat, *Applied Energy* 74 (1–2): 21–31, 2003
- [11] Lykov A.V., Michajlov J.A.: Teorija tieplo i masopierenoza, Gosenergoizdat, 1963
- [12] Nowak W., Borsukiewicz-Gozdur A., Wiśniewski S., Influence of working fluid evaporation temperature in the near-critical point region on the effectiveness of ORC power plant operation, *Archives of Thermodynamics* Vol. 33, no 3 (2012), pp. 77–87
- [13] NIST. RefProp 9.0, Standard Reference Database 23, Version 9.0, 2010, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA