

Gabriela SOŁTYSIK¹, Sławomir WIŚNIEWSKI¹, Władysław NOWAK¹

OCENA MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZENIA MOCY ELEKTROWNII GEOTERMALNEJ ZASILANEJ WODĄ ZE ZBIORNIKA DOLNOTRIASOWEGO POPRZEC ZASTĄPIENIE JEDNOOBIEGOWEJ SIŁOWNI ORC SIŁOWNIĄ BINARNĄ

STRESZCZENIE

W artykule przeprowadzono ocenę możliwości zwiększenia mocy elektrowni geotermalnej poprzez zastąpienie jednobiegunowej siłowni ORC siłownią binarną, przy czym przyjęto, że w obu przypadkach podstawowym nośnikiem energii jest woda geotermalna (o takim samym strumieniu masowym i takiej samej temperaturze), eksploatowana ze zbiornika dolnotriasowego. W przypadku, gdy w siłowni binarnej zaistnieje konieczność doprowadzenia dodatkowego strumienia wody do podgrzewacza obiegu dolnego można wykorzystać wody z innego zbiornika, np. ze zbiornika środkowotriasowego. W obiegu górnym siłowni binarnej oraz siłowni jednobiegunowej zastosowano taki sam czynnik roboczy mokry, tzn. trifluoroiodometan, natomiast w obiegu dolnym zastosowano czynnik roboczy suchy R227ea. Rozwiązanie polegające na zastosowaniu siłowni binarnej pozwoliło na uzyskanie większej mocy układu w stosunku do mocy uzyskanej w jednobiegunowej siłowni ORC, przy założeniu, że siłownia jednobiegunowa i siłownia binarna pracują w takim samym zakresie temperatur.

SŁOWA KLUCZOWE

Siłownia ORC, siłownia binarna, czynnik organiczny, siłownia jednobiegunowa, sprawność energetyczna

* * *

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Techniki Ciepłej, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin; e-mail: Gabriela.Soltysik@zut.edu.pl; Sławomir.Wisniewski@zut.edu.pl

WPROWADZENIE

Wykorzystanie odnawialnych nośników energii w Polsce od kilku lat nie ulega znaczącej zmianie. Świadczą o tym dane publikowane przez Główny Urząd Statystyczny (Berent-Kowalska i in. 2017). Z ostatniego raportu wynika, że w roku 2016 udział energii z odnawialnych źródeł w energii pierwotnej ogółem w Polsce wynosił 13,5%. Spośród tych źródeł największy udział miała biomasa, a energia geotermalna stanowiła zaledwie 0,24% energii pozyskanej ze źródeł odnawialnych. Przy dość bogatych zasobach wód geotermalnych w Polsce, jest to wynik bardzo mały. Zasoby wód geotermalnych szacowane są na ponad 6600 km³, jednakże temperatury tych wód zazwyczaj nie przekraczają 100°C (Sokołowski 1996). Taka charakterystyka zasobów geotermalnych pozwala na bezpośrednie wykorzystanie tej energii w systemach ciepłowniczych: centralne ogrzewanie, przygotowanie ciepłej wody użytkowej, baseny termalne itp. (Kępińska 2016).

Pozyskiwanie energii geotermalnej z głębszych pokładów (poniżej 3000 m) przekłada się na wyższe temperatury czynnika na wypływie z odwiertu, co pozwala na wykorzystanie wody geotermalnej w układach ORC do generacji energii elektrycznej. Pomimo tego w Polsce na chwilę obecną nie ma żadnego funkcjonującego układu ORC zasilanego wodą geotermalną. Jednym z funkcjonujących układów ORC w Polsce jest instalacja w Ostrowie Wielkopolskim, a dokładnie instalacja w Ostrowskim Zakładzie Ciepłowniczym OZC SA. Jest to jednak układ zasilany olejem termalnym, który jest podgrzewany w kotle opalonym biomasą (http://www.ozcsa.pl/index.php?show=energia_elektryczna).

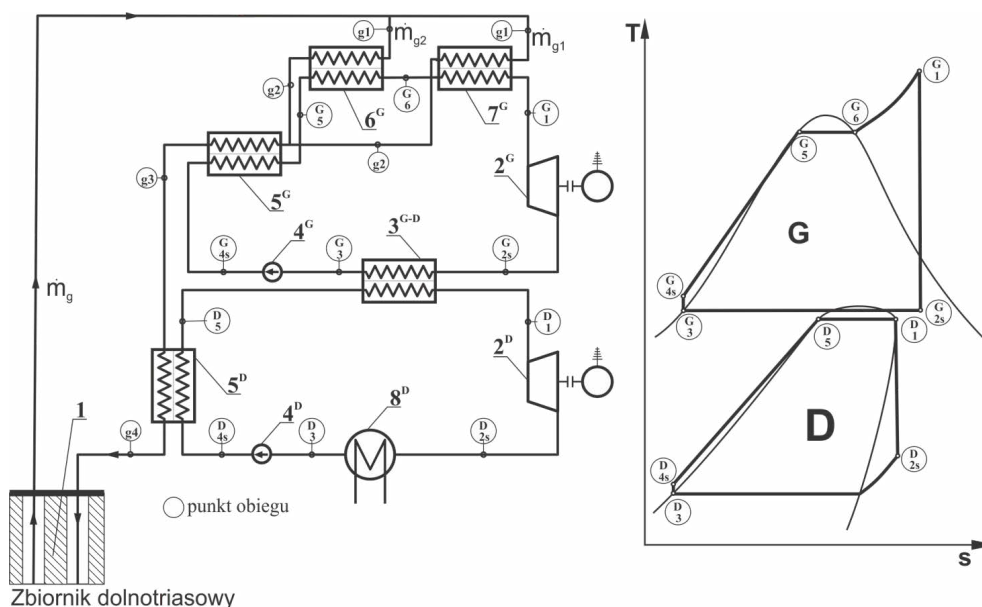
Jak wynika z prac (Górecki i in. 2006; Sowizdzał 2016; Chodkiewicz i in. 2001) wody wydobywane ze zbiorników triasowych, w niektórych obszarach, charakteryzują się znaczną temperaturą (ponad 120, 130°C) oraz, zwłaszcza w obszarze Niżu Polskiego, wysoką mineralizacją. Wysoka mineralizacja może stwarzać pewne problemy eksploatacyjne. Tematyka związana z tymi problemami, jak i sposobami ich rozwiązywania poruszana była w wielu pracach (Noga i in. 2013; Biernat i in. 2010; Banaś i in. 2007). Jednakże obecny stan wiedzy, jak i stosowane technologie pozwalają na skuteczną eksploatację wód geotermalnych, nawet o wysokiej mineralizacji. Przykładem jest działająca od 1996 roku ciepłownia w Pyrzycach.

1. OPIS UKŁADU

Rozpatrywany układ to siłownia binarna, pracująca zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Składa się ona z dwóch obiegów Clausiusa-Rankine'a – górnego oraz dolnego. W skład obiegu górnego wchodzi: podgrzewacz 5^G, parowacz 6^G, przegrzewacz 7^G, turbogenerator 2^G, pompa obiegowa 4^G oraz wymiennik typu skraplacz-parowacz 3^{G-D}, który jest elementem łączącym obieg górny z dolnym. Obieg dolny, poza wymiennikiem typu skraplacz-parowacz 3^{G-D}, składa się z turbogeneratora 2^D, skraplacza 8^D, pompy obiegowej 4^D oraz podgrzewacza 5^D. Czynnikiem roboczym w obiegu górnym jest czynnik mokry Trifluoriodometan, dla którego proces odparowania realizowany jest w temperaturze około 119,7°C,

a skraplania w temperaturze 104°C. W obiegu dolnym czynnikiem roboczym jest czynnik suchy R227ea, dla którego proces odparowania realizowany jest w temperaturze 101°C, a skraplania w temperaturze 29°C. Strumień masowy wody geotermalnej krążącej w obiegach wynosi 25 kg/s.

Siłownia binarna zasilana jest z jednego źródła ciepła, którym jest dolnotriasowy zbiornik wody geotermalnej 1. Strumień wody geotermalnej zasilający siłownię rozdziela się na dwa strumienie \dot{m}_{g1} i \dot{m}_{g2} . Strumień \dot{m}_{g1} przepływa przez przegrzewacz 7^G, a strumień \dot{m}_{g2} przez parowacz 6^G, po czym łączą się w jeden strumień przed podgrzewaczem 5^G obiegu górnego i przepływają przez niego. Następnie ten strumień wody zasila podgrzewacz 5^D obiegu dolnego. Po opuszczeniu podgrzewacza obiegu dolnego ochłodzona woda zatłaczana jest ponownie do złoża geotermalnego 1. W każdym z wymienników ciepła woda oddaje energię do czynników organicznych krążących w obiegach ORC.



Rys. 1. Schemat siłowni binarnej oraz cykl przemian termodynamicznych

Fig. 1. Scheme of binary power plant and cycle of thermodynamic changes

Czynnik obiegu górnego w pierwszej kolejności kierowany jest do podgrzewacza 5^G, gdzie odbierając ciepło od wody podgrzewa się od temperatury skraplania do temperatury parowania. Następnie czynnik trafia do parowacza 6^G, gdzie zostaje odparowany, po czym w postaci pary nasyconej suchej kierowany jest do kolejnego wymiennika, czyli przegrzewacza 7^G. W przegrzewaczu następuje wzrost temperatury pary. Następnie para przegrzana trafia do turbogenerатора 2^G, gdzie rozpręża się do ciśnienia odpowiadającego ciśnieniu skraplania. Po opuszczeniu turbogeneratora para trafia do wymiennika typu skraplacz-parowacz 3^{G-D}, który jest sprzężeniem cieplnym obiegu górnego z obiegiem dolnym. W wyni-

ku skraplania się czynnika obiegu górnego wydzielane jest ciepło, które wykorzystywane jest do odparowania czynnika w obiegu dolnym. Skropliny czynnika za pomocą pompy obiegowej 4^G są ponownie przetłaczane do podgrzewacza 5^G . Natomiast od strony obiegu dolnego czynnik roboczy suchy R227ea zostaje odparowany. Następnie czynnik ten trafia do turbogeneratora 2^D , gdzie rozpręża się do ciśnienia w skraplaczu 8^D . Po opuszczeniu turbogeneratora para trafia do skraplacza 8^D , gdzie ulega skropleniu. Skropliny czynnika za pomocą pompy obiegowej 4^D są przetłaczane do podgrzewacza 5^D , gdzie zostają podgrzane do temperatury parowania. Z podgrzewacza czynnik kierowany jest ponownie do wymiennika typu skraplacz-parowacz i cykl przemian się powtarza.

W dolnym obiegu czynnik dobrano tak, aby proces parowania zachodził w temperaturze zbliżonej do temperatury krytycznej. Oznacza to, że procesy odparowania przebiegają w obszarze bliskopodkrytycznym. Taki zabieg powoduje zwiększenie strumienia czynnika krążącego w układzie ORC, a to z kolei przekłada się na zwiększenie mocy układu. W przypadku wymiennika typu skraplacz-parowacz 3^{G-D} przy danym strumieniu doprowadzanego ciepła (strumień ciepła skraplania czynnika obiegu górnego), małe wartości entalpii parowania czynnika roboczego obiegu dolnego przekładają się na duże wartości strumienia tego czynnika. Wynika to z zależności (14). Moc obiegu dolnego, którą można określić z zależności (18), zależy od jednostkowej pracy dolnego obiegu Clausiusa-Rankine'a oraz strumienia masowego czynnika roboczego obiegu dolnego. Z tego jasno wynika, że wzrost strumienia czynnika roboczego w obiegu przekłada się na wzrost mocy tego obiegu.

Efektywność pracy siłowni binarnej, opisanej powyżej, porównana zostaje z efektywnością pracy jednoobiegowej siłowni ORC z takim samym czynnikiem obiegowym jak czynnik roboczy obiegu górnego siłowni binarnej. Kolejnym założeniem jest to, że temperatura pary przegrzanej na dopływie do turbiny w siłowni jednoobiegowej jest taka sama jak temperatura pary przegrzanej na dopływie do turbiny obiegu górnego siłowni binarnej.

Schemat siłowni jednoobiegowej powstaje, gdy z siłowni binarnej zostanie usunięty obieg dolny, a wymiennik typu skraplacz-parowacz zastąpiony zostanie klasycznym skraplaczem. Zatem siłownia jednoobiegowa zasilana jest wodą geotermalną z tego samego źródła co siłownia binarna i składa się z podgrzewacza, parowacza, przegrzewacza, turbogeneratora, skraplacza oraz pompy obiegowej. W siłowni jednoobiegowej woda geotermalna w pierwszej kolejności kierowana jest do przegrzewacza, następnie do parowacza i podgrzewacza. Po opuszczeniu podgrzewacza woda geotermalna zatłaczana jest ponownie do złoża geotermalnego. W przypadku siłowni jednoobiegowej strumień wody geotermalnej nie jest rozdzielany na dwa strumienie, tak jak ma to miejsce w siłowni binarnej.

2. ALGORYTM OBLICZEŃ

W pracy założono, że siłownia binarna zasilana jest wodą geotermalną o temperaturze $T_{g1} = 128^{\circ}\text{C}$, której strumień masowy wynosi $\dot{m}_g = 25 \text{ kg/s}$. Takie parametry wody geotermalnej można uzyskać przy pozyskiwaniu wód geotermalnych np. ze zbiorników dolnotriasowych.

W celu uproszczenia obliczeń w pracy przyjęto, że we wszystkich wymiennikach ciepła straty energii do otoczenia są równe zero (wymienniki adiatermiczne).

W celu wykonania obliczeń ciepłno-przepływowych posłużono się równaniami bilansu energii trzech poniżej wymienionych wymienników ciepła obiegu górnego. Przy zaniechaniu strat ciepła do otoczenia równania bilansów energii przyjmują następującą postać: dla przegrzewacza:

$$\dot{m}_n^G (h_1^G - h_6^G) = \dot{m}_{g1}^G (h_{g1} - h_{g2}) \quad (1)$$

— dla parowacza:

$$\dot{m}_n^G (h_6^G - h_5^G) = \dot{m}_{g2}^G (h_{g1} - h_{g2}) \quad (2)$$

— dla podgrzewacza:

$$\dot{m}_n^G (h_5^G - h_{4s}^G) = \dot{m}_{g3}^G (h_{g2} - h_{g3}) \quad (3)$$

gdzie:

- \dot{m}_n^G – strumień czynnika organicznego krążący w obiegu górnym,
- h^G – entalpia właściwa czynnika organicznego krążącego w obiegu górnym w charakterystycznych punktach obiegu Clausiusa-Rankine'a,
- \dot{m}_g – strumień wody geotermalnej,
- h_g – entalpia właściwa wody.

W pierwszej kolejności, w celu określenia strumienia czynnika organicznego w obiegu górnym, należy posłużyć się równaniem bilansu energii dla przegrzewacza (1) i parowacza (2). Po przekształceniu tych równań, zależność na strumień czynnika organicznego jest następująca:

$$\dot{m}_n^G = \dot{m}_g \frac{h_{g1} - h_{g2}}{\Delta h_{przeg}^G + \Delta h_{par}^G} \quad (4)$$

gdzie:

- Δh_{przeg}^G – jednostkowa entalpia właściwa przegrzania w obiegu górnym,
- Δh_{par}^G – jednostkowa entalpia właściwa parowania obiegu górnego.

W dalszej kolejności określono strumienie wody zasilającej przegrzewacz \dot{m}_{g1}^G oraz zasilającej parowacz \dot{m}_{g2}^G :

$$\dot{m}_{g1}^G = \dot{m}_g \frac{\Delta h_{przeg}^G}{(\Delta h_{przeg}^G + \Delta h_{par}^G)} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{g2}^G = \dot{m}_g \frac{\Delta h_{par}^G}{(\Delta h_{par}^G + \Delta h_{przeg}^G)} \quad (6)$$

W modelu obliczeniowym założono temperaturę wody zasilającej przegrzewacz i parowacz siłowni jednoobiegowej i obiegu górnego siłowni binarnej w związku z tym temperatura wody opuszczającej podgrzewacz T_{g3} jest wielkością wynikową z bilansu energii podgrzewacza.

Entalpia wody na wypływie z podgrzewacza:

$$h_{g3} = h_{g2} - (h_{g1} - h_{g2}) \cdot \left(\frac{\Delta h_{pod}^G}{\Delta h_{przeg}^G + \Delta h_{par}^G} \right) \quad (7)$$

gdzie:

Δh_{pod}^G – jednostkowa entalpia właściwa podgrzewania obiegu górnego.

Na podstawie wartości entalpii właściwej h_{g3} określono temperaturę wody T_{g3} na wypływie z podgrzewacza obiegu górnego.

Strumień wody opuszczający podgrzewacz:

$$\dot{m}_{g3}^G = \dot{m}_n^G \frac{\Delta h_{pod}^G}{(h_{g2} - h_{g3})} \quad (8)$$

Doprowadzany strumień ciepła w wymiennikach przegrzewacz, parowacz oraz podgrzewacz:

$$\dot{Q}_d^G = \dot{Q}_{przeg}^G + \dot{Q}_{par}^G + \dot{Q}_{pod}^G \quad (9)$$

gdzie:

- \dot{Q}_d^G – całkowity doprowadzany strumień ciepła,
- \dot{Q}_{przeg}^G – doprowadzany strumień ciepła w przegrzewaczu,
- \dot{Q}_{par}^G – doprowadzany strumień ciepła w parowaczu,
- \dot{Q}_{pod}^G – doprowadzany strumień ciepła w podgrzewaczu.

Zależność na moc obiegu górnego N_{C-R}^G przyjmuje następującą postać:

$$N_{C-R}^G = l_{C-R}^G \cdot \dot{m}_n^G \quad (10)$$

gdzie:

l_{C-R}^G – praca jednostkowa górnego obiegu Clausiusa-Rankine'a.

Sprawność obiegu górnego η_{C-R}^G określono z następującej zależności:

$$\eta_{C-R}^G = \frac{N_{C-R}^G}{\dot{Q}_d^G} \cdot 100 \quad (11)$$

W przypadku obiegu dolnego przyjęto założenie, że strumień wody sieciowej, doprowadzany z podgrzewacza obiegu górnego, w całości przepływa przez podgrzewacz odbiegu dolnego.

Biorąc to pod uwagę, równania bilansów energii dla wymienników ciepła wchodzących w skład obiegu dolnego, bez uwzględniania strat ciepła do otoczenia, przyjmują postać:

— dla wymiennika typu skraplacz-parowacz:

$$\dot{Q}_{s-p}^{G-D} = \dot{m}_n^G (h_{2s}^G - h_3^G) = \dot{m}_n^D (h_1^D - h_5^D) \quad (12)$$

— dla podgrzewacza:

$$\dot{m}_g [h_{g3}(T_{g3}) - h_{g4}(T_{g4})] = \dot{m}_n^D \Delta h_{pod}^D \quad (13)$$

gdzie:

- \dot{Q}_{s-p}^{G-D} – strumień ciepła doprowadzanego w wymienniku typu skraplacz-parowacz,
- \dot{m}_n^D – strumień czynnika organicznego krążący w obiegu dolnym,
- h^D – entalpia właściwa czynnika organicznego krążącego w obiegu dolnym w charakterystycznych punktach obiegu Clausiusa-Rankine'a,
- Δh_{pod}^D – jednostkowa entalpia właściwa podgrzewania obiegu dolnego.

W pierwszej kolejności określono strumień czynnika organicznego krążącego w obiegu dolnym z przekształconego równania bilansu energii (12):

$$\dot{m}_n^D = \dot{m}_n^G \frac{h_{2s}^G - h_3^G}{h_1^D - h_5^D} \quad (14)$$

Natomiast w drugiej kolejności obliczono entalpię właściwą wody z przekształconej zależności (13):

$$h_{g4} = h_{g3} - \frac{\dot{m}_n^D \Delta h_{pod}^D}{\dot{m}_s} \quad (15)$$

Temperatura wody T_{g4} została odczytana z programu RefProp 9.0 (NISIT 2010) na podstawie wartości entalpii właściwej h_{g4} .

Zależność na strumień ciepła doprowadzanego w podgrzewaczu $\dot{Q}_d^D = \dot{Q}_{pod}^D$ przyjmuje postać:

$$\dot{Q}_d^D = \dot{Q}_{pod}^D \quad (16)$$

gdzie:

- \dot{Q}_{pod}^D – strumień ciepła doprowadzanego w podgrzewaczu.

$$\dot{Q}_w^D = \dot{m}_n^D (h_{2s}^D - h_3^D) \quad (17)$$

gdzie:

\dot{Q}_w^D – strumień ciepła wyprowadzanego z obiegu dolnego.

Zależność na moc obiegu dolnego przyjmuje następującą postać:

$$N_{C-R}^D = l_{C-R}^D \cdot \dot{m}_n^D \quad (18)$$

gdzie:

N_{C-R}^D – moc obiegu dolnego,

l_{C-R}^D – praca jednostkowa obiegu dolnego.

Wzór na sprawność obiegu dolnego jest następująca:

$$\eta_{C-R} = \frac{C-R}{C-R} \cdot 100 \quad (19)$$

gdzie:

η_{C-R}^D – sprawność obiegu dolnego.

W dalszej części metodyki obliczeń przedstawione zostaną zależności pozwalające na określenie parametrów pracy siłowni binarnej.

Doprowadzany całkowity strumień ciepła do siłowni binarnej \dot{Q}_d^B składa się ze strumienia ciepła doprowadzanego do obiegu górnego ze źródła ciepła oraz strumienia ciepła doprowadzanego do obiegu dolnego w podgrzewaczu tego obiegu. Strumień ten określono z zależności poniżej:

$$\dot{Q}_d^B = \dot{Q}_d^G + \dot{Q}_d^D \quad (20)$$

Strumień ciepła odprowadzany do otoczenia z obiegu binarnego \dot{Q}_w^B jest taki sam jak strumień ciepła wyprowadzanego z obiegu dolnego \dot{Q}_w^D .

Suma mocy obiegu górnego i obiegu dolnego jest mocą całkowitą siłowni binarnej N_{C-R}^B :

$$N_{C-R}^B = N_{C-R}^G + N_{C-R}^D \quad (21)$$

Sprawność η_{C-R}^B siłowni binarnej:

$$\eta_{C-R}^B = \frac{N_{C-R}^B}{\dot{Q}_d^B} \cdot 100 \quad (22)$$

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wszystkie parametry czynników obiegowych, jak i wody geotermalnej, przy pominięciu jej stopnia mineralizacji, wyznaczono z wykorzystaniem bazy czynników organicznych RefProp (NISIT 2010). Odpowiednie zestawienia tych wielkości dla czynników obiegowych siłowni binarnej oraz siłowni jednoobiegowej, jak i dla wody, przedstawiono w tabelach 1, 2 i 3.

Tabela 1

Zestawienie temperatur i entalpii właściwych czynników obiegowych w siłowni binarnej w charakterystycznych punktach obiegów górnego i dolnego

Table 1

Comparison of temperature and enthalpy values of the relevant circulating fluids in a binary power plant at characteristic points of the upper and lower circuits

Obieg – czynnik	Obieg górny – czynnik Trifluoriodometan						Obieg dolny – czynnik R227ea					
	G_1	G_{2s}	G_3	G_{4s}	G_5	G_6	D_1	D_{2s}	D_2	D_3	D_{4s}	D_5
$T [^{\circ}\text{C}]$	125,0	104,0	104,0	106,6	119,7	119,7	101,0	29,6	29,0	29,0	30,4	101,0
$h [\text{kJ/kg}]$	315,3	312,9	265,1	265,7	281,0	305,4	361,3	343,3	342,7	233,4	235,2	341,3

Tabela 2

Zestawienie temperatur i entalpii właściwych wody geotermalnej i w poszczególnych punktach siłowni binarnej

Table 2

Comparison of the values of the temperatures and enthalpy of the proper geothermal water, at individual points of the binary power plant

Punkty obiegu	g1	g2	g3	g4
$T [^{\circ}\text{C}]$	128	122,7	120,3	81,0
$h [\text{kJ/kg}]$	537,9	515,4	505,4	339,3

Tabela 3

Zestawienie temperatur i entalpii właściwych czynnika obiegowego Trifluoriodometanu i wody geotermalnej w charakterystycznych punktach siłowni jednoobiegowej

Table 3

Comparison of the temperature and enthalpy values of the specific circulating agent Trifluoriodomethane and water at the characteristic points of a single-cycle power plant

Czynnik	Trifluoriodometan						Woda		
	1	2s	3	4s	5	6	g1	g2	g3
$T [^{\circ}\text{C}]$	125,0	29,0	29,0	30,7	109,0	109,0	128,0	112,0	96,9
$h [\text{kJ/kg}]$	325,0	305,4	215,8	217,1	269,4	311,7	537,9	469,9	405,9

Otrzymane wyniki obliczeń charakteryzujące efektywność pracy siłowni binarnej i siłowni jednoobiegowej przedstawiono w tabelach 4, 5, 6 i 7.

Tabela 4

Zestawienie wyników obliczeń wielkości charakteryzujących pracę obiegu górnego siłowni binarnej z czynnikiem obiegowym Trifluoroiodometanem

Table 4

Comparison of the results of calculations of the quantities characterizing the operation of the upper binary cycle with the working fluid Trifluoroiodomethane

\dot{m}_n^G	\dot{m}_{g1}^G	\dot{Q}_{przeg}^G	\dot{m}_{g2}^G	\dot{Q}_{par}^G	\dot{m}_{g3}^G	\dot{Q}_{pod}^G	\dot{Q}_d^G	N_{C-R}^G	η_{C-R}^G
kg/s	kg/s	kW	kg/s	kW	kg/s	kW	kW	kW	%
16,36	7,20	161,49	17,80	399,26	25,00	250,99	811,74	29,87	3,68

Tabela 5

Zestawienie wyników obliczeń wielkości charakteryzujących pracę obiegu dolnego z czynnikiem R227ea siłowni binarnej (czynnik roboczy obiegu górnego Trifluoroiodometanu)

Table 5

Results of calculations of values characterizing the work of the bottom circuit with R227ea working fluid of the binary power plant (working fluid of the upper circuit Trifluoroiodomethane)

\dot{m}_n^D	\dot{Q}_{s-p}^{G-D}	\dot{Q}_{pod}^D	\dot{Q}_d^D	\dot{Q}_w^D	N_{C-R}^D	η_{C-R}^D
kg/kJ	kW	kW	kW	kW	kW	%
39,10	781,75	4152,19	4152,19	4294,96	639,09	15,39

Tabela 6

Zestawienie wyników obliczeń wielkości charakteryzujących pracę siłowni binarnej (czynnik roboczy obiegu górnego – Trifluoroiodometan, dolnego – R227ea)

Table 6

List of results of calculations of quantities characterizing the operation of a binary power plant (working fluid of the upper circuit – Trifluoroiodomethane, bottom – R227ea)

\dot{Q}_d^B	\dot{Q}_w^B	N_{C-R}^B	η_{C-R}^B
kW	kW	kW	%
4963,93	4294,96	668,97	13,48

Tabela 7

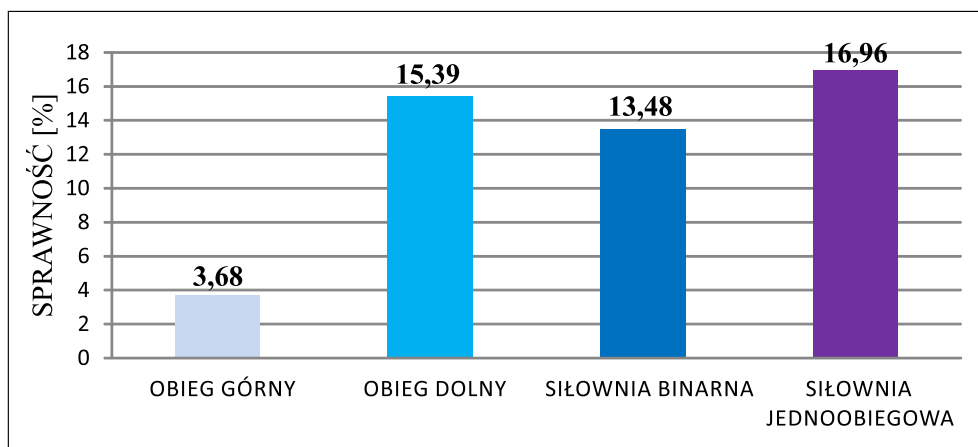
Parametry pracy jednoobiegowej siłowni ORC z czynnikiem mokrym Trifluoriodometanem

Table 7

The one-cycle ORC power plant operation parameters with wet working fluid Trifluoriodomethane

\dot{m}_n	\dot{m}_{g1}	\dot{Q}_{przeg}	\dot{m}_{g2}	\dot{Q}_{par}	\dot{m}_{g3}	\dot{Q}_{pod}	\dot{Q}_d	N_{C-R}	η_{C-R}
kg/s	kg/s	kW	kg/s	kW	kg/s	kW	kW	kW	%
30,58	5,96	405,16	19,04	1294,09	25,00	1600,23	3299,48	559,74	16,96

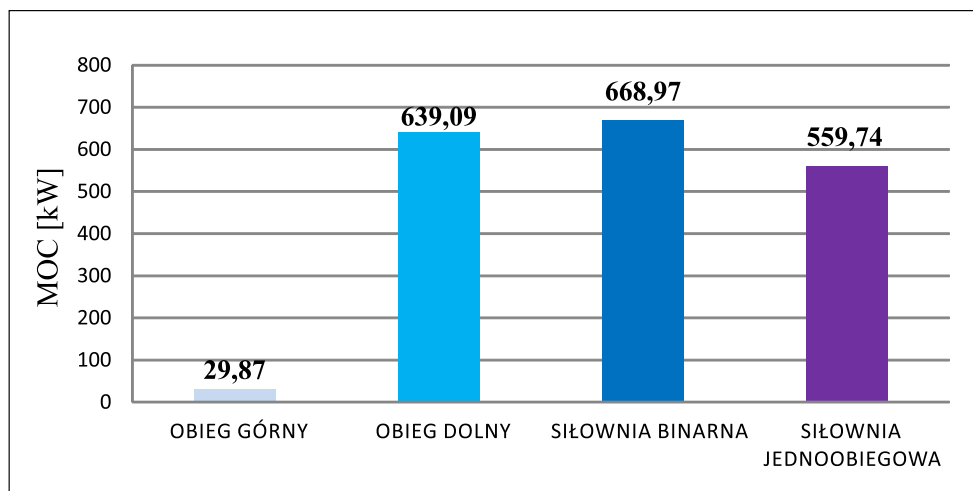
Porównanie sprawności obiegu górnego z czynnikiem organicznym mokrym Trifluoriodometanem i obiegu dolnego z czynnikiem organicznym suchym R227ea, jak i całej siłowni binarnej oraz siłowni jednoobiegowej zostało przedstawione na rysunku 2, w formie wykresu słupkowego.



Rys. 2. Sprawność rozpatrywanych obiegów siłowni binarnej oraz siłowni jednoobiegowej

Fig. 2. The efficiency of the considered binary power plant and one-cycle ORC power plant

Porównanie mocy obiegów górnego z czynnikiem organicznym mokrym Trifluoriodometanem i dolnego z czynnikiem organicznym suchym R227ea, całej siłowni binarnej oraz siłowni jednoobiegowej zostało przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Moc rozpatrywanych obiegów siłowni binarnej oraz siłowni jednoobiegowej

Fig. 3. The power of the considered binary power plant and one-cycle ORC power plant

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie siłowni binarnej pozwala na osiągnięcie większej mocy w porównaniu do mocy uzyskanej dla siłowni jednoobiegowej z tym samym mokrym czynnikiem roboczym i przy tych samych parametrach wody geotermalnej zasilającej siłownię. Z przeprowadzonej analizy wynika, że schłodzenie wody geotermalnej w siłowni binarnej jest większe niż w siłowni jednoobiegowej. W przypadku siłowni binarnej woda geotermalna ochładza się do 81°C, natomiast w siłowni jednoobiegowej do 96,9°C.

Analizując wyniki zestawione na wykresie (rys. 3) widać, że zastosowanie siłowni binarnej powoduje około 20% wzrost mocy układu w stosunku do mocy siłowni jednoobiegowej.

Z analizy uzyskanych obliczeń wynika, że sprawność termiczna siłowni jednoobiegowej jest większa od sprawności termicznej siłowni binarnej, natomiast moc siłowni binarnej jest znacznie większa od mocy siłowni jednoobiegowej. Z punktu widzenia wykorzystania energii geotermalnej ważniejszym parametrem jest moc, jaką można uzyskać przy danym rozwiązaniu technicznym siłowni ORC. Spośród analizowanych układów to siłownia binarna pozwala na większe wykorzystanie energii cieplnej zawartej w wydobywanej wodzie geotermalnej.

LITERATURA

- Banaś i in. 2007 – Banaś, J., Mazurkiewicz, B. i Solarski, W. 2007. Korozja metali w wodach geotermalnych. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 2, s. 5–12.

- Berent-Kowalska i in. 2017 – Berent-Kowalska, G., Kacprowska, J., Moskal, I., Piwko, B. i Jurgaś, A. 2017. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2016 r. Informacje i opracowania statystyczne*. Warszawa: Główny Urząd Statystyczny.
- Biernat i in. 2010 – Biernat, H., Kulik, S. i Noga, B. 2010. Problemy związane z eksploatacją ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1–2, s. 17–28.
- Chodkiewicz i in. 2001 – Chodkiewicz, R., Hanausek, P. i Pruchnicki, J. 2001. Pozyskiwanie energii elektrycznej ze źródła geotermalnego (na przykładzie możliwości wykorzystania otworu wiertniczego na terenie politechniki Łódzkiej). *Ciepłne Maszyny Przepływowe* No. 120.
- Górecki, W. i in. 2006. *Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim*. Kraków.
- Kępińska, B. 2016. Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej na świecie i w Europie w latach 2013–2015. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1, s. 5–13.
- NISIT. 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.
- Noga i in. 2013 – Noga, B., Biernat, H., Martyka, P., Kulik, S., Zieliński, B., Marianowski, J. i Nalikowski, A. 2013. Analiza poprawy efektywności działania ciepłowni geotermalnej w Pyrzycach w wyniku zastosowania modyfikacji odczynu pH zatłaczanej wody termalne. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1, s. 59–72.
- [Online] http://www.ozcsa.pl/index.php?show=energia_elektryczna [Dostęp: 28.08.2018].
- Sokołowski, J. 1996. Metodyka oceny zasobów geotermalnych i warunki ich występowania w Polsce, Rozdział 7 [W]: *Metody oceny zasobów i zasady projektowania zakładów geotermalnych*, Kraków.
- Sowizdzał, A. 2016. Potencjał geotermalny zbiorników mezozoicznych niżu polskiego do produkcji energii elektrycznej. *Techniki Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 2, s. 105–116.

ASSESSMENT OF POSSIBILITIES TO INCREASE THE POWER OF A GEOTHERMAL POWER PLANT WITH WATER FROM A LOWER TRIASSIC RESERVOIR THROUGH THE REPLACEMENT OF ONE-CYCLE ORC POWER PLANT BY BINARY POWER PLANT

ABSTRACT

Assessment of the possibility of increasing the power of a geothermal power plant supplied with water from the lower Triassic reservoir by replacing the single-cycle ORC power plant with a binary power plant. In the paper was evaluated the possibility of increasing power by replacing the single-cycle ORC power plant with a binary power plant, with the assumption that in both cases the basic energy carrier is water with the same mass flow and the same

temperature that is taken from the lower Triassic tank. Due to the fact that in the binary power plant there will be a necessity to supply an additional stream supplying the bottom circuit, it is possible to use water from the middle Triassic reservoir. In the case of the upper binary and the single-cycle, the same wet working medium was used, while in the lower circuit a dry working medium was used to obtain the maximum power of the lower circuit. In connection with the above, in the case of a binary power plant, a correspondingly higher power will be obtained in relation to the power value obtained in the single-cycle ORC power plant. It should be emphasized that the one-gear and binary power plant in the same temperature range.

KEYWORDS

ORC power plant, binary power plant, organic fluid