

Sławomir WIŚNIEWSKI¹, Gabriela SOŁTYSIK¹, Władysław NOWAK¹

OCENA EFEKTYWNOŚCI PRACY JEDNOOBIEGOWEJ ELEKTROWNI ORC ZASILANEJ WODĄ GEOTERMALNĄ ZE ZBIORNIKÓW DOLNO- I ŚRODKOWOTRIASOWEGO, PRZY ZASTOSOWANIU MOKREGO I SUCHEGO CZYNNIKA ROBOCZEGO

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę cieplno-przepływową elektrowni geotermalnej z jednoobiegowym układem ORC zasilanym dwoma strumieniami wody geotermalnej o różnych temperaturach. Strumienie tych wód wydobywane są z dwóch zbiorników triasowych. Pierwszy ze zbiornika dolnotriasowego, a drugi ze zbiornika środkowotriasowego. Strumienie tych wód kierowane są do wymienników ciepła układu ORC, gdzie przekazują energię cieplną do czynnika roboczego siłowni. W wyniku przeprowadzonej analizy porównano efektywność pracy siłowni z suchym czynnikiem obiegowym i siłowni z mokrym czynnikiem obiegowym. Podstawowym kryterium oceny efektywności pracy analizowanych układów jest osiągnięta moc przy zasilaniu obu układów tymi samymi strumieniami wody geotermalnej. Przeprowadzona analiza wykazała, że dla przyjętych założeń korzystniejszym rozwiązaniem jest układ ORC z suchym czynnikiem obiegowym.

SŁOWA KLUCZOWE

Siłownia ORC, elektrownia geotermalna, czynnik organiczny

* * *

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

WPROWADZENIE

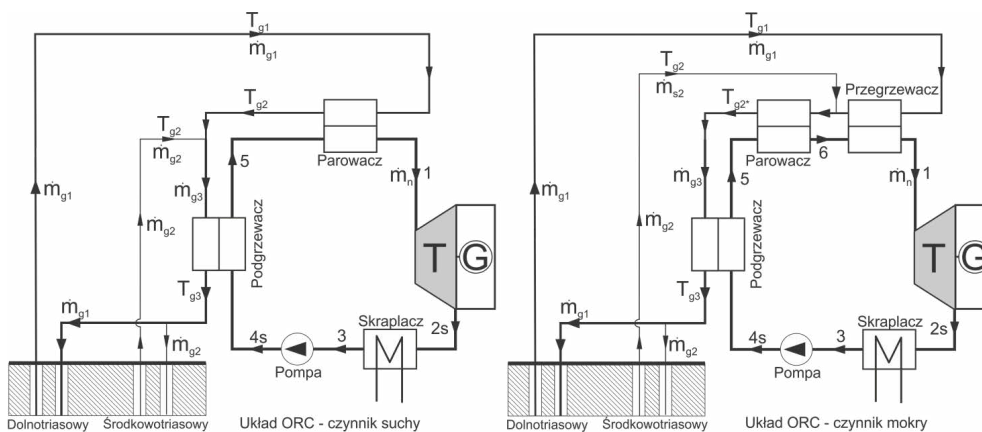
Energia odnawialna, do której zalicza się również energia geotermalna, w wielu krajach stanowi znaczny udział w bilansie energetycznym (Kępińska 2016). Jako przykład można podać Islandię, gdzie ponad 90% budynków ogrzewanych jest energią pochodzącą z geotermii. W Polsce wykorzystanie źródeł odnawialnych jest na niezbyt wysokim poziomie. Udział energii odnawialnej w energii pierwotnej ogółem w Polsce, według raportu GUS, wynosi około 13,5% (Berent-Kowalska i in. 2017). Z danych przedstawionych w tym raporcie wynika również, że spośród odnawialnych źródeł energii najmniejszy udział ma energia geotermalna, stanowiąca zaledwie 0,24% energii pozyskanej ze źródeł odnawialnych. Biorąc pod uwagę to, iż zasoby polskich wód geotermalnych szacowane są na 6600 km³ (Sokołowski 1996), jest to bardzo mały udział. Wynika to z faktu, że energia geotermalna w Polsce wykorzystywana jest jedynie do celów ciepłowniczych. Taki stan rzeczy podyktowany jest w dużej mierze tym, że dostępne zasoby geotermalne charakteryzują się niezbyt wysokimi temperaturami. Do głębokości 3000 m temperatury te nie przekraczają 100°C (Górecki i in. 2006). Zwiększenie udziału energii geotermalnej w bilansie energetycznym Polski można uzyskać poprzez budowę nowych ciepłowni geotermalnych. Druga możliwość to nowe inwestycje w elektrownie geotermalne, przy czym biorąc pod uwagę charakterystykę temperaturową polskich zasobów geotermalnych realne zastosowanie mają jedynie elektrownie ORC. Aktualnie w Polsce nie ma żadnej funkcjonującej elektrowni ORC zasilanej wodą geotermalną. Przykładem działającej siłowni ORC w Polsce, jednak niezasilanej energią geotermalną, jest instalacja w Ostrowskim Zakładzie Ciepłowniczym OZC SA w miejscowości Ostrów Wielkopolski. Jest to układ wykorzystujący jako źródło ciepła biomasę, która jest spalana w kotle (http://www.ozcsa.pl/index.php?show=energia_elektryczna).

1. OPIS ANALIZOWANYCH UKŁADÓW

W pracy rozpatrywany jest wariant siłowni ORC z jednym obiegiem, do którego doprowadzane są dwa strumienie wody geotermalnej. Pierwszy strumień ze zbiornika dolnotriasowego, a drugi ze zbiornika środkowotriasowego. Ze zbiorników tych istnieje możliwość pozyskiwania wód geotermalnych o dość wysokich temperaturach, wynoszących nawet ponad 120°C (Górecki i in. 2006; Sowizdzał 2016; Chodkiewicz i in. 2001).

W układzie siłowni ORC przewidziana jest możliwość zastosowania suchego lub mokrego czynnika obiegowego. To sprawia, że w zależności od zastosowanego czynnika układy ORC będą się nieznacznie różniły. W przypadku układu ORC z tzw. mokrym czynnikiem obiegowym zachodzi konieczność znacznego przegrzania pary czynnika obiegowego, natomiast w przypadku układu z suchym czynnikiem obiegowym nie ma takiej potrzeby (lub przegrzew jest niewielki: 1–3 K powyżej temperatury odparowania). Z tego względu w siłowni ORC z mokrym czynnikiem obiegowym pojawi się, poza wymiennikiem ciepła typu podgrzewacz i parowacz, dodatkowy przegrzewacz.

Na rysunku 1 przedstawiono dwa układy siłowni ORC, zasilane dwoma strumieniami wody geotermalnej. Układ z lewej strony to siłownia ORC z suchym czynnikiem obiegowym, natomiast układ z prawej strony to siłownia z mokrym czynnikiem obiegowym.



Rys. 1. Schemat jednoobiegowej siłowni ORC (lewy – z czynnikiem suchym, prawy – z czynnikiem mokrym)

Fig. 1. Scheme of one-cycle ORC power plant (left – with dry working fluid, right – with wet working fluid)

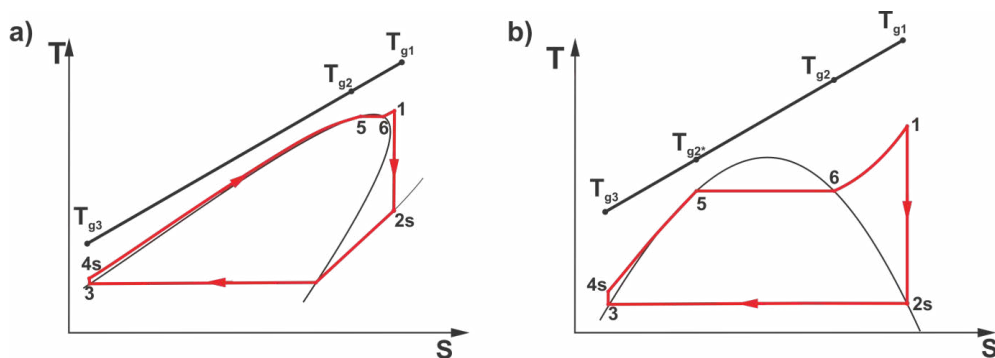
Jak wynika ze schematów przedstawionych na rysunku 1, woda geotermalna ze zbiornika dolnotriasowego kierowana jest w przypadku siłowni z suchym czynnikiem obiegowym do parowacza, a w przypadku siłowni z czynnikiem mokrym do przegrzewacza, a następnie do parowacza. Drugi strumień wody geotermalnej (jako strumień dodatkowy), ze zbiornika środkowotriasowego, w przypadku układu z czynnikiem suchym kierowany jest do podgrzewacza, natomiast w przypadku układu z mokrym czynnikiem obiegowym kierowany jest do parowacza. W obu układach za podgrzewaczami strumienie te są ponownie rozdzielane i zatłaczane osobno do zbiorników środkowotriasowego i dolnotriasowego.

Cykle przemian termodynamicznych w obiegach porównawczych dla rozpatrywanych układów siłowni przedstawiono na rysunku 2 (strona lewa – czynnik suchy, strona prawa – czynnik mokry.)

2. ZAŁOŻENIA I METODYKA OBLICZEŃ

Analiza efektywności pracy jednoobiegowych siłowni ORC z suchym i mokrym czynnikiem obiegowym przeprowadzona została przy założeniu, że obie siłownie są zasilane z tych samych źródeł ciepła, tzn. wodą ze zbiornika dolnotriasowego i środkowotriasowego.

W analizie po wstępnych obliczeniach uwzględniono dwa czynniki obiegowe. Z grupy czynników suchych obliczenia wykonano dla czynnika R227ea, natomiast z grupy czynników mokrych dla czynnika R22.



Rys. 2. Wykres przemian dla jednoobiegowej siłowni ORC (lewy – z czynnikiem suchym, prawy – z czynnikiem mokrym)

Fig. 2. Cycle of thermodynamic changes in ORC power plant (left – with dry working fluid, right – with wet working fluid)

Założenia szczegółowe:

- odparowanie czynników przebiega w obszarze podkrytycznym, temperatura skraplania $T_{skr} = 29^{\circ}\text{C}$.
- siłownia zasilana jest z dwóch źródeł ciepła: źródło 1 – zbiornik geotermalny dolnotriasowy z wodą o temperaturze na wypływie $T_{g1} = 128^{\circ}\text{C}$ i strumieniu masowym $\dot{m}_{g1} = 25 \text{ kg/s}$, źródło 2 – zbiornik geotermalny środkowotriasowy z wodą o temperaturze na wypływie $T_{g2} = 104^{\circ}\text{C}$ strumieniu masowym $\dot{m}_{g2} = 55 \text{ kg/s}$,
- sposób zasilania zgodny ze schematami przedstawionymi na rysunku 1,
- temperatura wody za parowaczem dla układu z czynnikiem R227ea wynosi $T_{g2} = 104^{\circ}\text{C}$, dla układu z czynnikiem R22 $T_{g2*} = 98^{\circ}\text{C}$,
- temperatura wody za podgrzewaczami dla układu z czynnikiem R227ea wynosi $T_{g3} = 33^{\circ}\text{C}$, a dla układu z czynnikiem R22 wynika z bilansu podgrzewacza,
- pominięto wpływ stopnia mineralizacji wody geotermalnej na parametry termiczne (ciepło właściwe, entalpia właściwa).

W celu porównania efektywności pracy układu ORC z suchym i mokrym czynnikiem obiegowym zasilanym ze zbiorników dolnotriasowego i środkowotriasowego, należy określić moc i sprawność analizowanego układu.

Moc analizowanych układów wynika ze strumienia czynnika obiegowego \dot{m}_n w układzie ORC oraz spadku entalpii właściwej czynnika w turbinie. W zależności na moc układu ORC uwzględniona została również praca pompowania. Zależność na moc układu przedstawia się następująco:

$$N_{C-R} = \dot{m}_n (h_1 - h_{2s} - (h_{4s} - h_3)) \quad (1)$$

Sprawność obiegu ORC określono jako stosunek mocy obiegu do ciepła doprowadzonego w wymiennikach układu ORC:

$$\eta_{C-R} = \frac{N_{C-R}}{\dot{Q}_d} = \frac{N_{C-R}}{\dot{Q}_{prz} + \dot{Q}_{par} + \dot{Q}_{pod}} \quad (2)$$

W zależności (2) odpowiednie strumienie ciepła (przegrzania \dot{Q}_{prz} , parowania \dot{Q}_{par} , podgrzania \dot{Q}_{pod}) wyznaczono następująco. Dla układu z suchym czynnikiem obiegowym:

$$\dot{Q}_{par} = \dot{m}_n(h_1 - h_5) = \dot{m}_{g1}(h_{g1} - h_{g2}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{pod} = \dot{m}_n(h_5 - h_{4s}) = \dot{m}_{g3}(h_{g2} - h_{g3}) \quad (4)$$

Dla układu z mokrym czynnikiem obiegowym:

$$\dot{Q}_{prz} = \dot{m}_n(h_1 - h_6) = \dot{m}_{g1}(h_{g1} - h_{g2}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{par} = \dot{m}_n(h_6 - h_5) = \dot{m}_{g3}(h_{g2} - h_{g2*}) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{pod} = \dot{m}_n(h_5 - h_{4s}) = \dot{m}_{g3}(h_{g2*} - h_{g3}) \quad (7)$$

Zależności (3), (4), (5), (6) i (7) wynikają bezpośrednio z bilansów energii wymienników ciepła wchodzących w skład układów ORC, przy pominięciu strat ciepła do otoczenia.

Strumień czynnika roboczego w układzie ORC wynika z zależności (3) dla czynnika R227ea oraz zależności (5) dla czynnika R22.

Wymagany strumień wody geotermalnej doprowadzanej do podgrzewacza układów ORC z suchym czynnikiem obiegowym oraz parowacza układu ORC z mokrym czynnikiem obiegowym wynika z bilansu energii tych wymienników. W przypadku, gdy wartość tego strumienia jest większa od wartości strumienia \dot{m}_{g1} , należy brakującą różnicę doprowadzić z drugiego źródła (zbiornika środkowotriasowego), dla którego możliwy do wykorzystania strumień wody geotermalnej wynosi $\dot{m}_{g2} = 55$ kg/s.

Zatem strumień wody geotermalnej \dot{m}_{g2} doprowadzany ze zbiornika środkowotriasowego określono z zależności (8) dla układu z czynnikiem R227ea oraz zależności (9) dla układu z czynnikiem R22:

$$\dot{m}_{g2} = \dot{m}_{g3} - \dot{m}_{g1} = \frac{\dot{m}_n(h_5 - h_{4s})}{h_{g2} - h_{g3}} - \dot{m}_{g1} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{g2} = \dot{m}_{g3} - \dot{m}_{g1} = \frac{\dot{m}_n(h_6 - h_5)}{h_{g2} - h_{g2*}} - \dot{m}_{g1} \quad (9)$$

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Parametry termiczne i kaloryczne analizowanych czynników roboczych w charakterystycznych punktach obiegu wyznaczono z wykorzystaniem bazy RefProp 9.0 (NISIT, 2010). Zestawienie tych parametrów dla czynnika suchego R227ea i czynnika mokrego R22 zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Termiczne i kaloryczne parametry czynników R227ea i R22 w charakterystycznych punktach obiegu

Table 1

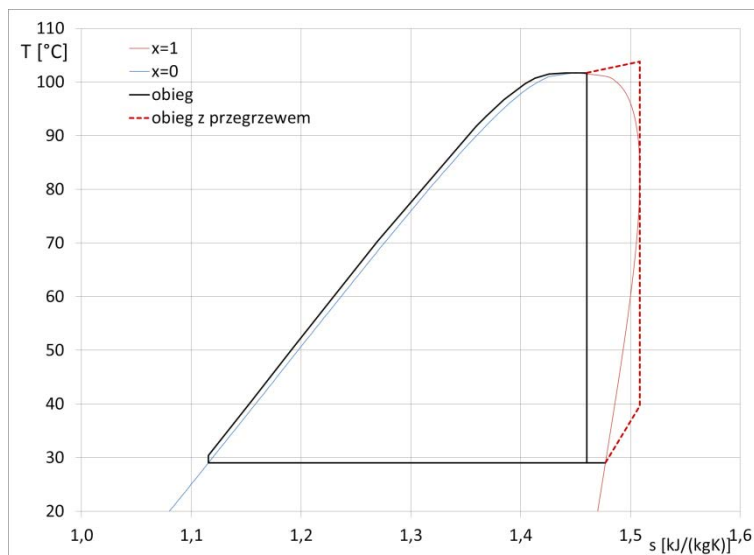
Thermal and caloric parameters of R227ea and R22 fluids at characteristic points of circulation

Czynnik	Charakterystyczny punkt obiegu											
	1		2s		3		4s		5		6	
	T	h	T	h	T	h	T	h	T	h	T	h
	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg
Suchy R227ea	103,8	372,6	39,6	352,4	29,0	233,4	30,4	235,2	101,7	347,3	101,7	354,5
	103,3	372,5	39,6	352,4	29,0	233,4	30,4	235,2	101,3	343,0	101,3	359,7
	102,8	372,4	39,6	352,4	29,0	233,4	30,4	235,2	100,9	340,9	100,9	361,8
	102,3	372,4	39,6	352,4	29,0	233,4	30,3	235,1	100,5	339,2	100,5	363,1
Mokry R22	120,5	449,1	29,0	414,0	29,0	235,3	31,6	238,5	95,3	351,3	95,3	385,4
	119,5	448,8	29,0	414,0	29,0	235,3	31,6	238,5	94,6	347,3	94,6	389,6

W przypadku obiegu ORC z mokrym czynnikiem obiegowym założono, że proces rozprężania pary w turbinie przebiegał będzie do osiągnięcia parametrów odpowiadających parze nasyconej suchej przy temperaturze skraplania 29°C (przebieg przemian zgodny z prawym wykresem przedstawionym na rysunku 2). W przypadku obiegu z czynnikiem suchym proces rozprężania pary w turbinie przebiegał będzie do osiągnięcia ciśnienia odpowiadającego ciśnieniu nasycenia przy temperaturze skraplania wynoszącej 29°C. Kolejnym założeniem dotyczącym obiegu ORC z suchym czynnikiem obiegowym jest przyjęcie procesu odparowania czynnika w obszarze bliskopodkrytycznym. Zabieg ten wpływa na zmniejszenie entalpii właściwej parowania, co przekłada się na zwiększenie strumienia czynnika obiegowego w układzie ORC. Z drugiej strony, przy tak poprowadzonym procesie odparowania, para nasycona sucha nie może być skierowana do turbiny, ponieważ proces rozprężania zachodziłby w obszarze pary mokrej (zobrazowano to na rysunku 3). Taka sytuacja doprowadziłaby do szybkiego zużycia i awarii turbiny. W celu uniknięcia tego problemu należy przegrzać parę czynnika obiegowego o $\Delta T = 2-3$ K w stosunku do temperatury parowania (można tego dokonać w samym parowaczu, bez konieczności stosowania dodatkowego wymiennika).

Korzystny wpływ takiego przegrzania pary, w obiegu z odparowaniem w obszarze bliskopodkrytycznym, zobrazowano na rysunku 3. Zabieg ten w pomijalnie małym stopniu

wpływa na efektywność pracy obiegu, ale znacząco poprawia warunki pracy turbiny (eliminuje się w ten sposób zjawisko erozji łopatek).



Rys. 3. Wykres przemian dla analizowanego obiegu ORC z suchym czynnikiem obiegowym przy przyjętych założeniach i uwzględnieniu przegrzania

Fig. 3. Cycle of thermodynamic changes for the analyzed ORC power plant with a dry working fluid with the assumptions made and taking into account the overheating

Efektywności pracy układu ORC z suchym i mokrym czynnikiem obiegowym zasilanym wodą geotermalną ze zbiorników dolno i środkowotriasowego określono wyznaczając moc i sprawność analizowanego układu. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Parametry określające efektywność pracy układów ORC dla czynników R227ea i R22

Table 2

Parameters defining the ORC work efficiency for R227ea and R22 working fluids

Czynnik	T_{s1}	T_{s2}	T_{s2*}	T_{s3}	\dot{m}_{g2}	\dot{m}_n	l_{C-R}	N_{C-R}	η_{C-R}
	°C	°C	°C	°C	kg/s	kg/s	kJ/kg	kW	%
Suchy R227ea	128,0	104,0	–	33,0	13,0	100,73	18,42	1855,8	13,41
	128,0	104,0	–	33,0	6,2	86,16	18,37	1582,9	13,38
	128,0	104,0	–	33,0	3,6	80,56	18,32	1476,0	13,35
	128,0	104,0	–	33,0	1,8	76,75	18,27	1402,2	13,31
Mokry R22	128,0	104,0	98,0	60,8	28,8	39,91	31,90	1273,0	15,15
	128,0	104,0	98,0	74,3	46,9	42,98	31,62	1359,0	15,03

Jak wykazały przedstawione w tabeli 2 wyniki obliczeń, przy przyjętych założeniach, zarówno w układzie siłowni ORC z mokrym, jak i suchym czynnikiem obiegowym zachodzi konieczność zastosowania dwóch strumieni wody geotermalnej. W przypadku czynnika mokrego R22, w pewnych warunkach, przyjmując odpowiednie założenia, dodatkowy strumień wody geotermalnej doprowadzany do parowacza lub podgrzewacza nie jest wymagany. Taki wariant nie był analizowany w niniejszej pracy.

WNIOSKI

Wykorzystanie do zasilania układu ORC dwóch źródeł ciepła (dwóch strumieni wody geotermalnej) umożliwia zwiększenie mocy układu. Wzrost mocy układu w takim rozwiązaniu wynika z doprowadzenia dodatkowego strumienia ciepła do wymienników układu ORC. W przypadku układu rozważanego w pracy strumień tego ciepła dostarczany był ze strumieniem wody geotermalnej wydobywanej ze złoża środkowotriasowego.

Przeprowadzona analiza wykazała, że większą efektywność pracy siłowni ORC zasilanej dwoma strumieniami wody geotermalnej uzyskano dla siłowni z czynnikiem suchym R227ea. W przypadku tego czynnika osiągnięta moc wynosiła 1855,8 kW, natomiast w przypadku czynnika R22 możliwa do uzyskania moc to 1359,0 kW. Dodatkową korzyścią w przypadku układu ORC z suchym czynnikiem obiegowym jest mniejsza liczba wymienników ciepła w stosunku do układu z mokrym czynnikiem obiegowym. W układzie z suchym czynnikiem obiegowym nie występuje przegrzewacz, co zmniejsza koszty inwestycyjne instalacji.

Z danych przedstawionych w tabeli 2 wynika również to, że w przypadku obu czynników drugi, dodatkowy strumień wody doprowadzanej ze zbiornika środkowotriasowego, zależy zarówno od charakteru czynnika (mokry czy suchy) oraz parametrów pracy obiegu takich jak temperatura odparowania oraz związana z nią temperatura przegrzania. Zmiana temperatur odparowania i przegrzania powoduje zmianę wartości entalpii właściwych parowania i przegrzania, co w konsekwencji powoduje zmianę strumienia czynnika organicznego krążącego w obiegu. Zmienność ta wynika bezpośrednio z równań bilansów energii parowacza i przegrzewacza. Konsekwencją zmiany strumienia czynnika organicznego w układzie ORC jest zmiana wartości strumienia dodatkowego wody geotermalnej doprowadzanej ze źródła środkowotriasowego.

LITERATURA

- 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.
- Chodkiewicz i in. 2001 – Chodkiewicz, R., Hanausek, P. i Ruchnicki, J. 2001. Pozyskiwanie energii elektrycznej ze źródła geotermalnego (na przykładzie możliwości wykorzystania otworu wiertniczego na terenie politechniki Łódzkiej). *Ciepłe Maszyny Przepływowe* nr 120, s. 19–37.

- 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.
- [Online] http://www.ozcsa.pl/index.php?show=energia_elektryczna [Dostęp: 20.08.2018].
- 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.
- Sowiżdżał, A. 2016. Potencjał geotermalny zbiorników mezozoicznych niżu polskiego do produkcji energii elektrycznej. *Techniki Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 2, s. 105–116.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ONE-CYCLE ORC POWER PLANT SUPPLIED BY GEOTHERMAL WATER FROM LOWER AND MIDDLE TRIASSIC RESERVOIRS, USING A WET AND DRY WORKING FLUIDS

ABSTRACT

In the paper have been presented a thermal and flow analysis of a geothermal power plant with a one-cycle ORC system supplied with two geothermal water streams of different temperatures. The streams of these waters are extracted from two Triassic reservoirs. The first from the bottom tank and the second from the middle tank. The streams of these waters are directed to the heat exchangers of the ORC system, where they transmit thermal energy to the working medium of the power plant. As a result of the conducted analysis, the efficiency of the operation of the power plant with a dry circulating factor and a power plant with a wet circulation factor was compared. The analysis carried out showed that for the assumptions made, a more favorable consideration is the ORC system with a dry circulating factor.

KEYWORDS

ORC power plant, geothermal power plant, organic working fluid

