

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

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2016

ANALIZA PORÓWNAWCZA ZASTOSOWANIA CZYNNIKÓW R227ea I R1234ze JAKO PŁYNÓW ROBOCZYCH W ELEKTROWNI GEOTERMALNEJ TYPU ORC

STRESZCZENIE

W referacie przedstawione zostały wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych siłowni organicznej ORC, przeprowadzonych w Katedrze Techniki Ciepłej ZUT w Szczecinie. Badania przeprowadzono dla dwóch czynników organicznych R227ea i R1234ze. Układ ORC zasilany był wodą z miejskiej sieci ciepłowniczej (SEC Szczecin), której temperatura wynosiła od 91 i 93°C. Takie parametry wody zasilającej elektrownię ORC są zbliżone z parametrami wód geotermalnych dostępnych w Polsce dla odwiertów o głębokości około 3000 m. Uzyskane wyniki były podstawą do przeprowadzenia oceny porównawczej efektywności pracy siłowni ORC z zastosowaniem dwóch różnych syntetycznych czynników organicznych. Dla układu z czynnikiem R227ea uzyskano moc 7,84 kWe i sprawność elektrowni na poziomie 4%, natomiast dla czynnika R1234ze odpowiednio 6,96 kWe i 2,77 %, przy czym należy podkreślić, że wykorzystywane w układzie turbiny są turbinami prototypowymi, zaprojektowanymi na nominalną prędkość obrotową 3000 obr/min. Obroty te uzyskano dzięki zastosowaniu rozwiązania z częściowym łukiem zasilania wynoszącym odpowiednio dla czynnika R227ea 11%, a dla R1234ze 8%. Pod względem termodynamicznym czynnik R227ea wydaje się być płynem o korzystniejszych właściwościach, natomiast rozpatrując aspekt ekologiczny czynnik R1234ze jest płynem o perspektywicznych zastosowaniach ze względu na niską wartość wskaźnika GWP =7.

SŁOWA KLUCZOWE

Elektrownia ORC, czynnik roboczy, czynnik organiczny, siłownie ORC, geotermia

* * *

WPROWADZENIE

W świetle Unijnych założeń przyjętych w ramach pakietu klimatyczno-energetycznego do roku 2020 w krajach Unii Europejskiej ma nastąpić wzrost udziału energii odnawialnej w bilansie energetycznym do 20%, spadek emisji CO₂ o 20% w stosunku do emisji z roku 1990 oraz wzrost efektywności energetycznej o 20%. W odniesieniu do energii odnawialnej Polska wynegocjowała zwiększenie tego udziału do 15%, co wynikało z faktu, że w roku 2005 w Polsce udział tej energii wynosił około 5%. Zgodnie z danymi publikowanymi przez Główny Urząd Statystyczny w opracowaniu „Energia ze źródeł odnawialnych w 2014 r.” (Berent-Kowalska i in. 2015) udział odnawialnych źródeł energii w całkowitym zużyciu energii pierwotnej w Polsce w roku 2014 wynosił 11,8%. Analizując lata wcześniejsze, tj. rok 2012 i 2013, dla których udziały energii odnawialnej wynosiły odpowiednio 11,7 i 11,9% widać, że w okresie tym nie następował wzrost udziału energii odnawialnej w całkowitej energii pierwotnej, a w stosunku do roku 2013 nastąpił nawet nieznaczny spadek tego udziału. Chcąc wypełnić zobowiązania nałożone przez Unię Europejską należy znacznie zwiększyć wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, w tym także energii geotermalnej. Z danych zamieszczonych w raporcie GUS (Berent-Kowalska i in. 2015) wynika, że w całkowitej ilości wykorzystanej energii odnawialnej udział energii geotermalnej wynosił zaledwie 0,25% (847,2 TJ) i w całości była to energia wykorzystana na cele ciepłownicze (zerowy udział energii geotermalnej w produkcji energii elektrycznej). Przy uwzględnieniu jednego z celów Unii Europejskiej dotyczącego rozwoju energetyki odnawialnej, jakim jest zwiększenie udziału energii elektrycznej wytworzonej z odnawialnych nośników energii, należy się zastanowić nad możliwością wykorzystania siłowni ORC zasilanej energią niskotemperaturową. Rozwiązanie takie daje również możliwość wykorzystania energii geotermalnej. Porównując potencjalne zasoby tej energii w Polsce, które według autorów publikacji (ARE 1998; Wiśniewski 2006; Wiśniewski i in. 2000) wynoszą od 200 000 do 220 000 TJ w stosunku do aktualnie wykorzystywanej ilości energii na poziomie 847,2 TJ (Berent-Kowalska i in. 2015), widać duże możliwości znaczącego zwiększenia udziału energii geotermalnej w bilansie krajowym. Nie chodzi tu tylko o wykorzystanie tej energii do celów ciepłowniczych i balneologii, ale również do produkcji energii elektrycznej.

Kolejnym ważnym aspektem związanym z odnawialnymi źródłami energii jest ich dyspozycyjność, która w przypadku energii geotermalnej jest znacznie większa niż w przypadku energii wiatrowej, czy też słonecznej. W przypadku wykorzystania tych nośników energii odnawialnej do produkcji energii elektrycznej ma to duże znaczenie z punktu widzenia pewności ruchu, co przekłada się na większą stabilność w sieci elektroenergetycznej kraju. Pod tym względem energia geotermalna wypada korzystniej. Zatem uwzględniając powyższe, naszym zdaniem celowe stają się analizy możliwości wykorzystywania zasobów geotermalnych do produkcji energii elektrycznej, co przedstawiono w niniejszym referacie.

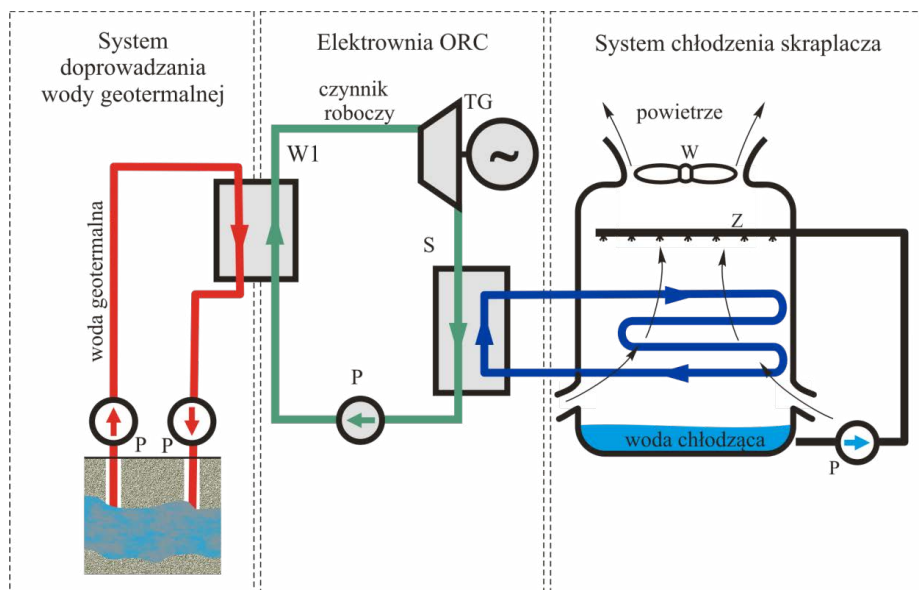
1. WYKORZYSTANIE ENERGII GEOTERMALNEJ W POLSCE

W Polsce na chwilę obecną wykorzystanie energii geotermalnej w sektorze energetycznym sprowadza się jedynie do celów ciepłowniczych. Spośród funkcjonujących na terenie Polski ciepłowni geotermalnych można wymienić kilka następujących zakładów: Ciepłownia Geotermalna Pyrzyce, Geotermia Podhalańska, Zakład Geotermalny Mszczonów, Geotermia Uniejów (Balcer 2015; Lipiński 2001; Ślimak, Wartak 2009; Kurpik 2007). Wymienione zakłady funkcjonują jako instalacje biwalentne, czyli oprócz źródła geotermalnego istnieje dodatkowe źródło ciepła w postaci kotłów szczytowych, w których spalane jest paliwo (np. gaz ziemny). Stosowanie dodatkowego źródła ciepła jest wymagane z uwagi na zbyt niskie parametry wody geotermalnej, wymuszające konieczność dogrzewania wody sieciowej w okresach najniższych temperatur zewnętrznych. Drugim problemem związanym z funkcjonowaniem ciepłowni geotermalnych jest to, że poza sezonem grzewczym (gdy znacznie spada zapotrzebowanie na ciepło) w ciepłowni podgrzewana jest tylko ciepła woda użytkowa, co w wielu przypadkach nie pozwala na pełne wykorzystanie potencjału (mocy) źródła geotermalnego. W przypadku wykorzystania zasobów geotermalnych do produkcji energii elektrycznej nie ma tego problemu, gdyż energię elektryczną można swobodnie przesyłać. Z tego powodu lokalizacja elektrowni geotermalnej nie musi być ściśle powiązana z lokalizacją odbiorców tej energii. Wystarczy, że elektrownia taka będzie włączona do sieci elektroenergetycznej kraju.

2. MOŻLIWOŚCI PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM ZASOBÓW GEOTERMALNYCH

Na świecie istnieje (funkcjonuje) szereg instalacji wykorzystujących energię geotermalną do generacji energii elektrycznej. W zależności od warunków, jakie panują w złożu geotermalnym, tj. temperatury i ciśnienia, czynnika stanu skupienia (woda lub para) oraz mineralizacji można zastosować różne rozwiązania elektrowni/elektrociepłowni (DiPippo 2005).

Polskie warunki geotermalne z uwagi na temperatury wody oraz formacji geologicznych (do głębokości 3000 metrów) wymuszają stosowanie układów z obiegiem Clausius'a-Rankine'a z niskowrzącym czynnikiem roboczym. Układ taki nazywany jest układem ORC (*Organic Rankine Cycle*), w którym czynnikiem realizującym poszczególne przemiany jest czynnik charakteryzujący się niską temperaturą wrzenia przy stosunkowo wysokim ciśnieniu, pozwalającym na realizację przemiany zachodzącej w turbinie. Schemat układu wraz z podstawowymi urządzeniami wchodzącymi w skład tego typu elektrowni przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Elektrownia geotermalna z podziałem na systemy: doprowadzania i wyprowadzania energii oraz układu konwersji ciepła geotermalnego na prąd elektryczny (Bujakowski, Tomaszewska (red.) 2014)
P – pompa, W1 – wymiennik ciepła, W – wentylator, S – skraplacz, TG – turbogenerator, Z – zraszacz

Fig. 1. Geothermal Power plant with the division into systems: supply and output of energy and the conversion of geothermal heat into electricity (Bujakowski, Tomaszewska (red.) 2014)

3. OPIS INSTALACJI BADAWCZEJ ORC W KTC ZUT W SZCZECINIE

Instalacja badawcza niskotemperaturowej siłowni ORC znajduje się w laboratorium Katedry Techniki Ciepłej ZUT w Szczecinie. Zasilana jest gorącą wodą z miejskiej sieci ciepłowniczej, natomiast chłodzenie realizowane jest poprzez obieg wody wychładzanej w mokrej chłodni wspomaganą wentylatorem. Układ ten pierwotnie został zaprojektowany do pracy na czynnikiem organicznym R227ea. Zastosowano wówczas hermetyczny turbogenerator z łożyskami tocznymi. W 2015 r. instalacja została zmodyfikowana, a zmiana polegała na zastosowaniu nowego czynnika roboczego R1234ze oraz nowego turbogenerators z hydrostatycznymi łożyskami ślizgowymi smarowanymi cieczą czynnika roboczego oraz modyfikacji układu kontrolno-pomiarowego. Pozostałe elementy układu (wymyenniki ciepła) pozostały bez zmian. Celem prac badawczych w pierwszym etapie była praktyczna realizacja siłowni z czynnikiem organicznym, zdobycie pierwszych doświadczeń, natomiast w drugim etapie (po modyfikacji) głównym celem prac badawczych było zastosowanie łożysk ślizgowych smarowanych cieczą czynnika roboczego. Zastosowanie takich łożysk pozwala na uniknięcie stosowania substancji smarnych w układzie, które to substancje przedostają się do czynnika roboczego zmieniając jego właściwości, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Ponadto, zastosowanie czynnika R1234ze miało na celu przetestowanie nowego czynnika termodynamicznego o korzystniejszych niż

R227ea wartościach wskaźników ekologicznych (ODP, GWP). W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry czynników R227ea oraz R1234ze.

Schemat opisanego powyżej układu przedstawiono na rysunku 2.

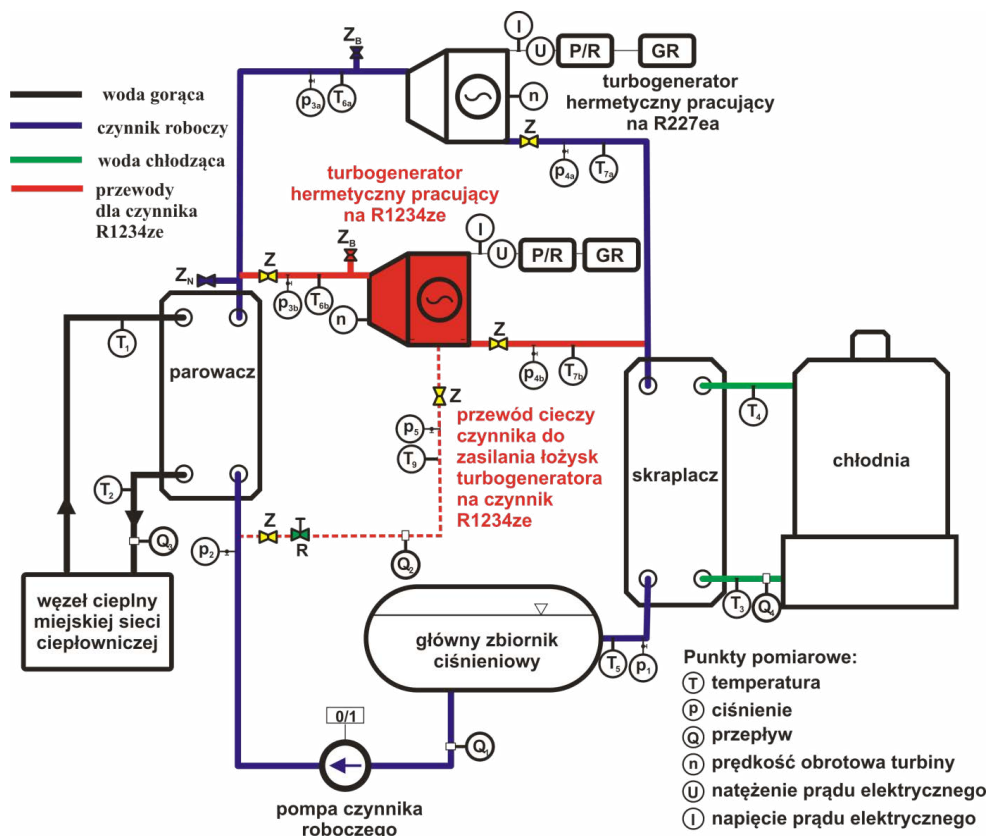
Tabela 1

Zestawienie podstawowych paramentów czynników R227ea i R1234ze

Table 1

Summary of the basic parameters of working fluids R227ea R1234ze

	Temperatura punktu potrójnego	Normalna temperatura wrzenia	Parametry punktu krytycznego			ODP	GWP
			temperatura	ciśnienie	gęstość		
	°C	°C	°C	MPa	km/m ³	-	-
R227ea	-126,8	-16,42	102,8	2,999	579,8	0	3220
R1234ze	-104,5	-18,95	109,4	3,636	489,2	0	7



Rys. 2. Schemat układu ORC (instalacja KTC ZUT w Szczecinie) (Raport... 2014)

Fig. 2. Scheme of ORC (installation in KTC ZUT, Szczecin) (Raport... 2014)

Cykl pracy siłowni jest następujący: czynnik roboczy z głównego zbiornika za pomocą pompy hermetycznej przelaczany jest do wymiennika ciepła, w którym następuje jego podgrzanie i odparowanie. Na schemacie wymiennik ten oznaczony jest jako parowacz. Z parowacza, czynnik w postaci lekko przegrzanej pary kierowany jest do turbogenerators hermetycznego, gdzie w wyniku rozprężania pary w turbinie uzyskiwana jest praca mechaniczna, która w generatorze konwertowana jest na energię elektryczną. Z turbogenerators para kierowana jest do skraplacza, z którego po skropleniu ponownie trafia do głównego zbiornika czynnika obiegowego.

W przypadku, gdy temperatura czynnika na wypływie z turbogenerators jest stosunkowo wysoka (45–55°C), co często ma miejsce w przypadku czynników suchych, to można wziąć pod uwagę możliwości użytecznego wykorzystania ciepła skraplania np. podgrzewanie wody w basenach.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Poniżej, w tabelach 2–4 zestawiono wyniki pomiarów oraz określonych na ich podstawie wartości sprawności i mocy siłowni dla poszczególnych czynników roboczych. Pomiaru efektywności pracy siłowni z czynnikiem R227ea zostały wykonane w dniu 18.03.2013, natomiast z czynnikiem R1234ze w dniu 08.04.2016. W tabeli 2 zestawiono parametry wody sieciowej, będącej górnym źródłem energii dla elektrowni.

Tabela 2

Parametry wody sieciowej (górne źródło ciepła)

Table 2

Parameters of water supplying the ORC power plant (upper heat source)

Rodzaj czynnika	Temperatura wody na dopływie do parowacza	Temperatura wody na wypływie z parowacza	Strumień objętości	Strumień masowy	Strumień ciepła doprowadzonego
	T_{w1} [°C]	T_{w2} [°C]	V_w [l/min]	m_w [kg/s]	Q_d [kW]
R227ea	91,1	38,5	53,2	0,88	193,8
R1234ze	93,4	56,5	97,8	1,61	251,4

Zestawienie parametrów czynników w poszczególnych punktach obiegu pokazano w tabeli 3. Wartości ciśnień absolutnych czynnika zostały obliczone przy uwzględnieniu wartości ciśnienia otoczenia, które wynosiło dla obu pomiarów $p_{ot} = 0,1$ MPa (1 bar).

W kolejnej tabeli (tab. 4) przedstawiono parametry pracy układu ORC dla dwóch badanych czynników R227ea i R1234ze.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów określono parametry kaloryczne czynników w poszczególnych punktach obiegu, co pozwoliło na wyznaczenie rzeczywistych przebiegów przemian zachodzących w obiegu ORC. Cykle przemian termodynamicznych

Tabela 3

Parametry termiczne czynnika w obiegu ORC

Table 3

Thermal parameters of the working fluids in the ORC installation

Rodzaj czynnika	Temperatura i ciśnienie czynnika za parowaczem		Temperatura i ciśnienie czynnika za turbiną		Temperatura i ciśnienie czynnika przed skraplaczem		Ciśnienie czynnika za pompą
	T_{n1}	P_{n1}	T_{n2}	P_{n2}	T_{n3}	P_{n3}	P_{n4}
	°C	bar	°C	bar	°C	bar	bar
R227ea	48,5	8,53	27,0	3,33	14,8	3,26	8,85
R1234ze	57,5	11,65	48,3	5,43	26,1	5,43	11,95

Tabela 4

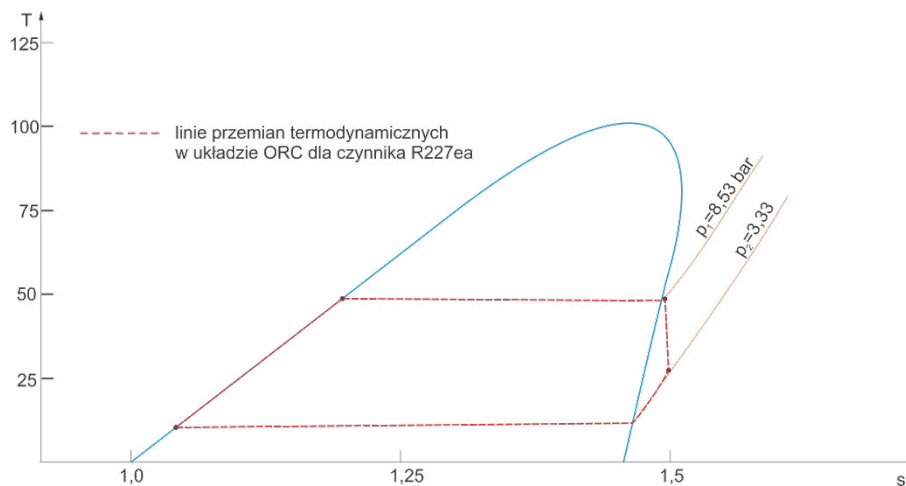
Parametry pracy układu ORC

Table 4

Operating parameters the ORC power plant

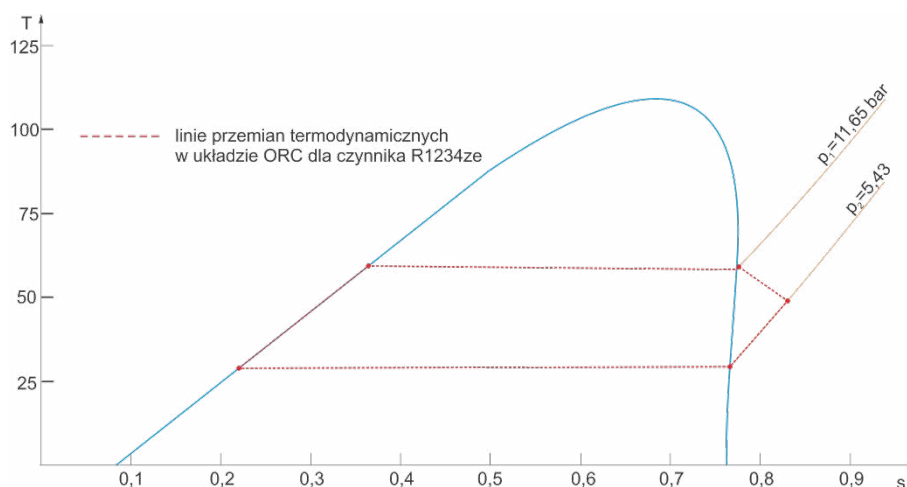
Rodzaj czynnika	Q_n	m_n	I	U	N_{el}	η_{el}
	l/min	kg/s	A	V	kW	%
R227ea	61,06	1,46	12,6	359	7,84	4,05
R1234ze	66,50	1,28	11,9	335,8	6,96	2,77

przedstawiono odpowiednio dla czynnika R227ea na rysunku 3, a dla czynnika R1234ze na rysunku 4.



Rys. 3. Wykresy rzeczywistych przemian zachodzących w układzie ORC na podstawie pomiarów dla czynnika R227ea

Fig. 3. Diagram of thermodynamic processes in the ORC on the basis of measurements of R227ea



Rys. 4. Wykresy rzeczywistych przemian zachodzących w układzie ORC na podstawie pomiarów dla czynnika R1234ze

Fig. 4. Diagram of thermodynamic processes in the ORC on the basis of measurements of R1234ze

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń efektywności pracy siłowni ORC zasilanej strumieniem wody o temperaturze 91 i 93°C z dwoma czynnikami roboczymi: w pierwszej kolejności badano siłownię z czynnikiem R227ea, w drugiej z czynnikiem R1234ze. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że badana elektrownia ORC przystosowana jest do pracy na czynniku R1234ze tylko pod względem turbinowym, natomiast pozostałe elementy układu są elementami z istniejącej wcześniej infrastruktury będącej na stanie KTC ZUT i przystosowanej do pracy na czynniku R227ea (np. wymienniki ciepła, których powierzchnia wymiany ciepła jest zbyt mała dla nowego czynnika R1234ze).

Dodatkowo należy wyjaśnić, że instalacja siłowni ORC znajdująca się w KTC ZUT jest instalacją prototypową, badawczą, o małej mocy. Z tego względu turbiny zainstalowane w tym układzie mają bardzo mały łuk zasilania: dla czynnika R227ea wynosi on 11% natomiast dla czynnika R1234ze 8%. Dla układów większej mocy możliwe będzie zastosowanie większego łuku zasilania, co z pewnością poprawi sprawność wewnętrzną turbiny.

W drugiej fazie badań zmieniono czynnik roboczy (na R1234ze); celem tej zmiany było zastosowanie czynnika roboczego o korzystniejszej (mniejszej) wartości wskaźnika ekologicznego GWP (ang. *global warming potential*) oraz sprawdzenie pod względem mechanicznym możliwości zastosowania czynnika roboczego o bardzo małej lepkości (mniejszej niż dla wody) jako substancji smarnej dla łożysk ślizgowych zastosowanych w turbogeneratorze. Pod tym względem cel badań został w pełni zrealizowany – łożyska ślizgowe zastosowane w turbogeneratorze, smarowane cieczą czynnika roboczego, działają w sposób

w pełni satysfakcjonujący w każdej fazie pracy elektrowni (w czasie pracy ciągłej, rozruchu, zatrzymania).

Podsumowując wyniki prac badawczych można stwierdzić, że pod względem ekologicznym czynnik R1234ze jest substancją perspektywiczną i może być rozważany jako płyn roboczy dla niskotemperaturowych elektrowni ORC, natomiast pod względem parametrów termodynamicznych lepszym czynnikiem wydaje się być płyn R227ea, głównie ze względu na mniejszą wymaganą powierzchnię wymiany ciepła, co bezpośrednio przekłada się na koszt instalacji.

PODZIĘKOWANIA

Wyniki badań zaprezentowane w niniejszym artykule zostały sfinansowane przez NCBR i NFOŚiGW oraz Lidera projektu Chochołowskie Termy Sp. z o.o. w ramach projektu nr GEKON1/04/213967/18/2014 "Innowacja w konwersji ciepła z Ziemi na energię elektryczną".

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.
- ARE, 1998 — Energia odnawialna. Stan obecny i perspektywy.
- WIŚNIEWSKI G., 2006 — Systemowe uwarunkowania wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce – rola bioenergii. [W:] „Realizacja inwestycji biomasowych – aspekty praktyczne” (materiały konferencyjne), Kraków, Ministerstwo Środowiska, UNDP/GEF, PFS.
- WIŚNIEWSKI G. i in., 2000 — Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania źródeł odnawialnych. EC BREC/IBMER, Warszawa.
- BALCER M., 2015 — Geotermia Mazowiecka – historia, teraźniejszość i przyszłość. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój, R. 54, nr 1.
- LIPIŃSKI K., 2001 — Wpływ wykorzystania energii geotermalnej na stan środowiska naturalnego gminy Pyrzyce. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój, R. 40, nr 5.
- ŚLIMAK C., WARTAK W., 2009 — PEC Geotermia Podhalańska S.A. Doświadczenia, stan obecny, perspektywy rozwoju. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój, R. 48, nr 2.
- KURPIK J., 2007 — Wykorzystanie wód geotermalnych na przykładzie „Geotermii Uniejów”. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój, R. 46, nr 2.
- DiPIPPA R., 2005 — Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies. Wydawca Elsevier Advanced Technology.
- Praca zbiorowa: Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w układach binarnych w Polsce pod red. Wiesława Bujakowskiego, Barbary Tomaszewskiej, Warszawa, Wydawnictwo „Jak”, 2014.

Raport z projektu GEKON /04/213967/18/2014, Innowacja w konwersji ciepła z Ziemi na energię elektryczną, dofinansowany przez NCBiR oraz NFOŚiGW, Lider Chochołowskie Termy Sp. z o.o.

COMPARATIVE ANALYSIS OF USING THE R227ea AND R1234ze AS WORKING FLUIDS IN ORC GEOTHERMAL POWER PLANT

ABSTRACT

The paper presents selected results of experimental measurements of the ORC power plant carried out at the Department of Thermal Engineering, West Pomerania University in Szczecin. The study was conducted for two organic working fluids: R227ea and R1234ze. The ORC system was supplied with water from the district heating network (SEC Szczecin), the water temperature was between 91 and 93°C. Such parameters of the water supplying ORC power plant are consistent with the parameters of geothermal water available in Poland for boreholes with a depth of approx. 3000 m. The results were the basis for carrying out a comparative analysis of the efficiency of the ORC power plant in which two different synthetic organic fluids were used. A power of 7.84 kWe and thermal efficiency of 4% was obtained for the R227eg working fluid, while for the medium R1234ze respectively 6.96 kWe and 2.77%, it must be stressed that the turbines used in the ORC power plant are prototypical turbines, designed for a nominal speed of 3000 rpm. Such low speeds are obtained by using a solution of a partial admission of the circumference, respectively for fluid R227ea 11% and 8% for R1234ze. Thermodynamically, the R227ea working fluid seems to have favorable properties, while considering the environmental aspects R1234ze is a liquid with prospective applications due to low GWP = 7.

KEYWORDS

ORC Power plant, working fluid, vapor power plant, geothermal energy