

## OBSZAR ZASTOSOWAŃ JEDNOOBIEGOWEJ PODKRYTYCZNEJ SIŁOWNI ORC W ELEKTROWNI ZASILANEJ WODĄ GEOTERMALNĄ Z JEDNEGO I DWÓCH ŹRÓDEŁ CIEPŁA

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono rozwiązania elektrowni organicznej, w której zastosowano podkrytyczną jednoobiegową siłownię z zastosowaniem suchego czynnika roboczego. Siłownia ta zasilana jest wodą geotermalną. Powyższa siłownia może być stosowana nie tylko w elektrowni, ale także w elektrociepłowni. Aby ustalić zasadność jej stosowania w jednym z dwóch wymienionych przypadków wprowadzono współczynnik  $\phi$ . Współczynnik ten zdefiniowano jako stosunek strumienia masowego wody  $\dot{m}_{s1}$  przepływającego przez przeciwprądowy wymiennik ciepła, w którym podgrzewana jest ciecz czynnika roboczego w granicach temperatur skraplania i parowania, do strumienia masowego wody  $\dot{m}_s$  opuszczającego parowacz zgodnie z zależnością  $\phi = \dot{m}_{s1} / \dot{m}_s$ . Przyjęto, że znany jest strumień masowy wody  $\dot{m}_s$  o znanej temperaturze  $T_{s1}$ , który podgrzewany jest w wymienniku ciepła, stanowiącym górne źródło ciepła. Wykonano obliczenia siłowni z zastosowaniem czterech czynników roboczych (R227ea, RC318, R1234yf i R1234ze) dla różnych temperatur parowania z uwzględnieniem temperatur blisko-podkrytycznych dla wybranych temperatur wody zasilającej. Na tej podstawie sporządzono wykresy  $\phi = f(T_{par})$  ilustrujące zakresy zastosowań jednoobiegowej siłowni w elektrowni/elektrociepłowni.

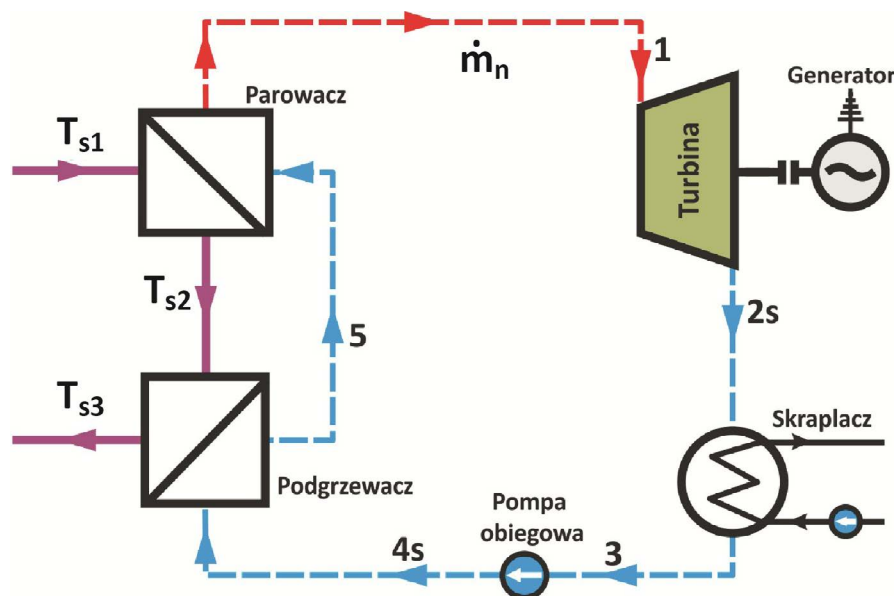
### SŁOWA KLUCZOWE

Siłownia ORC, elektrownia, woda geotermalna, czynniki suche

\* \* \*

### WPROWADZENIE

Punktem wyjścia przedstawionych w pracy rozważań jest elektrownia organiczna, w której zastosowano podkrytyczną jednoobiegową siłownię z zastosowaniem suchego czynnika roboczego. Siłownia ta zasilana jest wodą geotermalną (rys. 1).



Rys. 1. Schemat instalacji siłowni pracującej z czynnikiem suchym

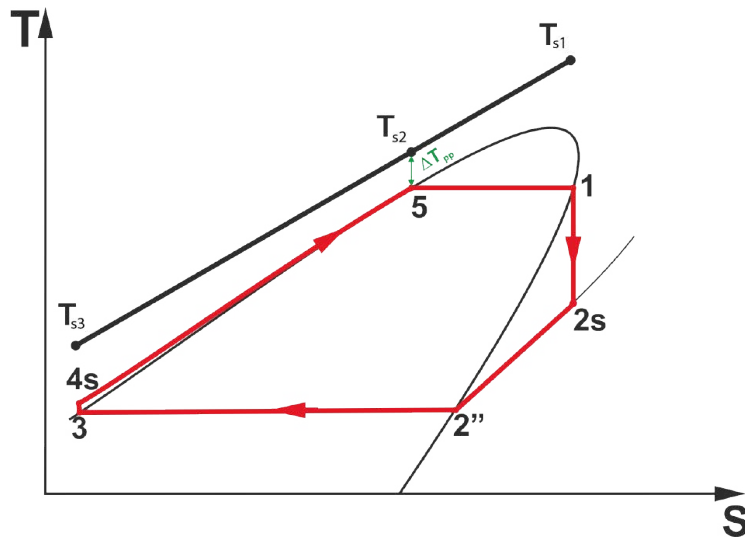
Fig. 1. Scheme of one cycle ORC system by using dry working fluids

Zasada działania siłowni ORC jest identyczna jak dla siłowni parowej. Na rysunku 2 przedstawiono cykle przemian termodynamicznych siłowni, zaznaczono także temperatury nośnika energii w odpowiednich punktach charakterystycznych.

Siłownia ORC z czynnikiem suchym jako medium roboczym składa się z parowacza, podgrzewacza, turbiny, skraplacza oraz pompy obiegowej czynnika organicznego. Krzywe przedstawione na rysunku 2 odzwierciedlają kolejne przemiany zachodzące w poszczególnych urządzeniach siłowni:

- przemiana 1-2s – izentropowe rozprężanie pary suchej czynnika organicznego w turbinie,
- przemiana 2s-3 – ochładzanie oraz skraplanie pary czynnika w skraplaczu,
- przemiana 3-4s – izentropowe przetłaczanie czynnika organicznego w pompie obiegowej,
- przemiana 4s-5 – podgrzewanie czynnika organicznego w wymienniku typu podgrzewacz od temperatury skraplania do temperatury parowania,
- przemiana 5-1 – odparowanie czynnika organicznego w parowaczu.

Przyjęto, że znany jest strumień masowy wody  $\dot{m}_s$  o znanej temperaturze  $T_{s1}$ , który podgrzewany jest w wymienniku ciepła, stanowiącym górne źródło ciepła (rys. 3 i 4). Ciepło pozyskiwane jest z wody geotermalnej – założono, że mamy do dyspozycji złoża o wysokim stopniu mineralizacji. Oczywiście możliwe jest prostsze rozwiązanie (wody o niskim stopniu mineralizacji), gdzie woda geotermalna będzie przepływała przez parowacz i skraplacz siłowni ORC (strumień  $\dot{m}_s$  będzie strumieniem wody geotermalnej).



Rys. 2. Cykl przemian termodynamicznych podkrytycznego obiegu ORC z czynnikiem suchym

Fig. 2. Thermodynamic processes cycle realised in the subcritical ORC cycle by using dry working fluids

Powyższa siłownia może być stosowana nie tylko w elektrowni, ale także w elektrociepłowni. Aby ustalić zasadność jej stosowania w jednym z dwóch niżej wymienionych przypadków wprowadzono współczynnik  $\phi$ .

### 1. WARIANTY PRACY ELEKTROWNI ( $\phi < 1$ ORAZ $\phi > 1$ ) ORAZ ALGORYTM OBLICZEŃ

W obliczeniach wykorzystano równania bilansu energii parowacza i podgrzewacza. Równanie bilansu energii parowacza można zapisać w następującej postaci:

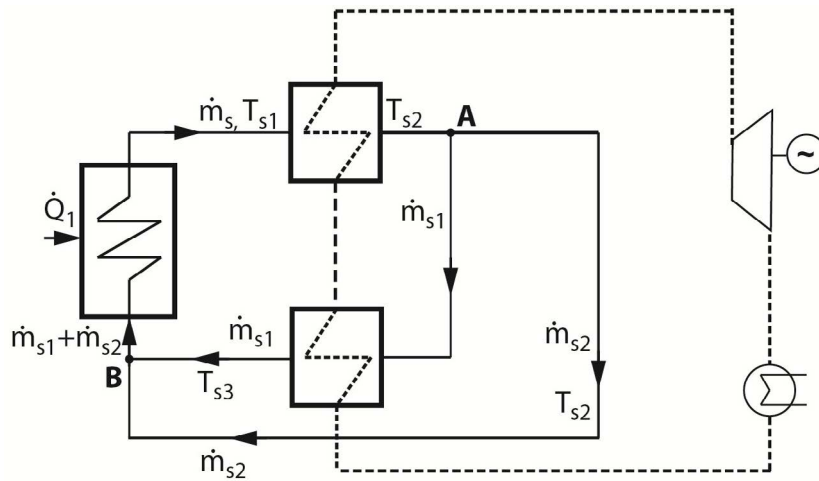
$$\dot{Q}_{par} = \dot{m}_s \cdot [h'_{s1} - h'_{s2}] = \dot{m}_n \cdot \Delta h_{par} \quad (1)$$

natomiast równanie bilansu energii podgrzewacza w postaci:

$$\dot{Q}_{pod} = \dot{m}_s \cdot [h'_{s2} - h'_{s3}] = \dot{m}_n \cdot \Delta h_{pod} \quad (2)$$

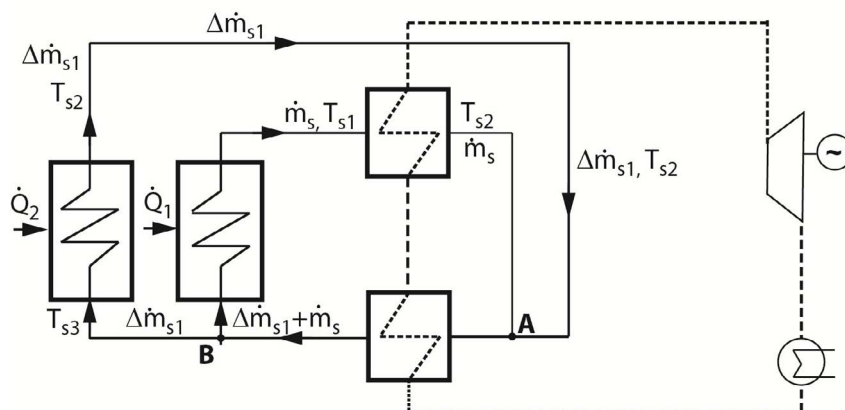
Współczynnik  $\phi$  zdefiniowano jako stosunek strumienia masowego wody  $\dot{m}_{s1}$  przepływającego przez przeciwprądowy wymiennik ciepła, w którym podgrzewana jest ciecz czynnika roboczego w granicach temperatur skraplania i parowania, do strumienia masowego wody  $\dot{m}_s$  opuszczającego parowacz zgodnie z zależnością:

$$\phi = \dot{m}_{s1} / \dot{m}_s \quad (3)$$



Rys. 3. Schemat przykładowej jednoobiegowej siłowni ORC zastosowanej w elektrowni dla przypadku  $\phi \leq 1$

Fig. 3. Scheme of one cycle ORC system by using in the power station for variant  $\phi \leq 1$



Rys. 4. Schemat przykładowej jednoobiegowej siłowni ORC zastosowanej w elektrowni dla przypadku  $\phi > 1$

Fig. 4. Scheme of one cycle ORC system by using in the power station for variant  $\phi > 1$

Z przeprowadzonych badań wynika, że dla powyższej siłowni współczynnik  $\phi$  na ogół spełnia warunek  $\phi \leq 1$ .

Jeżeli  $\phi = 1$ , to jednoobiegowa siłownia ma zastosowanie tylko w elektrowni. W tym przypadku strumień wody opuszczający parowacz  $\dot{m}_s$  jest równy strumieniowi masowemu wody  $\dot{m}_{s1}$ , który zasila podgrzewacz, to znaczy, że  $\dot{m}_s = \dot{m}_{s1}$ .

Na wielkość współczynnika  $\phi$  przy tym samym strumieniu wody zasilającej  $\dot{m}_s$  i przy tej samej temperaturze  $T_{s1}$  mają wpływ rodzaj zastosowanego suchego czynnika roboczego siłowni oraz rodzaj charakterystyki pracy parowacza siłowni.

Ta ostatnia obejmuje następujące podane różnice temperatur:  
— spadek temperatury wody zasilającej parowacz

$$\Delta T_s = T_{s1} - T_{s2} \quad (4)$$

równy różnicy temperatur wody na dopływie  $T_{s1}$  oraz na wypływie  $T_{s2}$  z parowacza,  
— różnica temperatur

$$\Delta T_{s1} = T_{s1} - T_{PAR} \quad (5)$$

jako różnica temperatur wody zasilającej parowacz  $T_{s1}$  i temperatury parowania czynnika roboczego  $T_{PAR}$ ,  
— różnica temperatur

$$\Delta T_{s2} = T_{s2} - T_{PAR} \quad (6)$$

jako różnica temperatur wody  $T_{s2}$  opuszczającej parowacz oraz temperatury parowania czynnika roboczego  $T_{PAR}$ .

Łatwo wykazać, że między podanymi różnicami temperatur  $\Delta T_s$ ,  $\Delta T_{s1}$ ,  $\Delta T_{s2}$  istnieje zależność:

$$\Delta T_s = \Delta T_{s1} - \Delta T_{s2} \quad (7)$$

Jeżeli nie ma możliwości zagospodarowania ciepła na cele technologiczne i ogrzewcze, rozwiązanie siłowni dla  $\phi < 1$  zostało także wykorzystane w elektrowni (rys. 3). Pozwoliło to uwzględnić ciągłość zmian  $\phi$  w charakterystyce z zakresu pracy siłowni oraz na opracowanie pełnego zakresu charakterystyki pracy siłowni w elektrowni dla  $\phi \leq 1$ , która stanowi podstawowy obszar tej charakterystyki pracy. Jeżeli  $\phi = 1$  wtedy  $\dot{m}_s = \dot{m}_{s1}$ , tzn. że  $\dot{m}_{s2} = 0$ . W takim przypadku nie jest potrzebny przewód łączący węzeł A z węzłem B na rysunku 3.

Prace realizowane w KTC (Mazurek i in. 2013, Nowak i in. 2012) wykazały, że współczynnik  $\phi$  może być równy i mniejszy od jedności ( $\phi \leq 1$ ), a także większy od jedności ( $\phi > 1$ ) i obejmuje wówczas drugi obszar zakresu charakterystyki pracy siłowni w elektrowni hybrydowej (zasilanie z dwóch źródeł, możliwość wykorzystania innej energii odpadowej – nie tylko wody geotermalnej).

W tym drugim obszarze charakterystyki pracy siłowni w elektrowni, podobnie jak w przypadku siłowni dla  $\phi = 1$ , strumień masowy wody  $\dot{m}_s$  o temperaturze  $T_{s2}$  opuszczający parowacz kierowany jest do podgrzewacza cieczy czynnika roboczego siłowni (rys. 4).

Ten strumień wody  $\dot{m}_s$  po obniżeniu swojej temperatury do  $T_{s3}$  kierowany jest do pierwszego wymiennika ciepła, który stanowi górne źródło ciepła instalacji. Strumień ten po uzyskaniu temperatury  $T_{s1}$  kierowany jest ponownie do parowacza siłowni.

Wymagany strumień wody  $\dot{m}_{s1}$ , który należy doprowadzić do podgrzewacza cieczy czynnika roboczego siłowni określono z wyrażenia definicyjnego współczynnika  $\phi$  (3). Strumień ten wynosi:

$$\dot{m}_{s1} = \dot{m}_s \cdot \phi \quad (8)$$

Biorąc pod uwagę, że do podgrzewacza cieczy czynnika roboczego siłowni doprowadzono bezpośrednio strumień masowy wody  $\dot{m}_s$  z parowacza, po uwzględnieniu zależności (8), do podgrzewacza cieczy czynnika roboczego należy doprowadzić dodatkowy strumień masowy wody  $\Delta\dot{m}_{s1}$ , którego wielkość można określić z niżej podanej zależności:

$$\Delta\dot{m}_{s1} = \dot{m}_{s1} - \dot{m}_s = \dot{m}_s (\phi - 1) \quad (9)$$

dla  $\phi > 1$ .

Strumień ten ( $\Delta\dot{m}_{s1}$ ) po podwyższeniu temperatury do wartości  $T_{s2}$  doprowadzany jest do podgrzewacza cieczy czynnika roboczego siłowni, w którym po obniżeniu temperatury do wartości  $T_{s3}$  kierowany jest ponownie do drugiego źródła ciepła.

Po uwzględnieniu bilansu parowacza i skraplacza wartość współczynnika  $\phi$  możemy określić z zależności:

$$\phi = \frac{(\Delta T_{s1} - \Delta T_{s2})}{(T_5 - T_{4s})} \cdot \frac{\Delta h_{POD}}{\Delta h_{PAR}} = \frac{\Delta T_s}{T_{PAR} - T_{4s}} \cdot \frac{\Delta h_{POD}}{\Delta h_{PAR}} \quad (10)$$

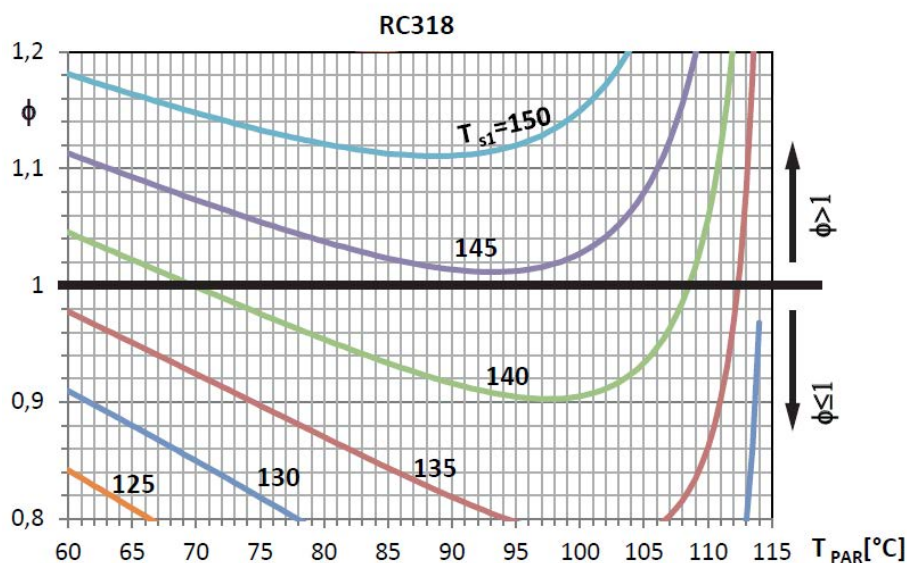
## 2. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia siłowni wykonano dla różnych czynników roboczych dla wybranych temperatur wody zasilającej, dla temperatury skraplania  $T_{SKR} = 29^\circ\text{C}$ . Temperatury parowania  $T_{PAR}$  zmieniano od  $60^\circ\text{C}$  do wartości temperatury podkrytycznej, której wartość zależy od rodzaju czynnika roboczego.

Na tej podstawie, po wykonaniu obliczeń, opracowano wykresy  $\phi = (T_{PAR})$  ilustrujące zakresy zastosowań jednoobiegowej siłowni w elektrowni (rys. 5–8).

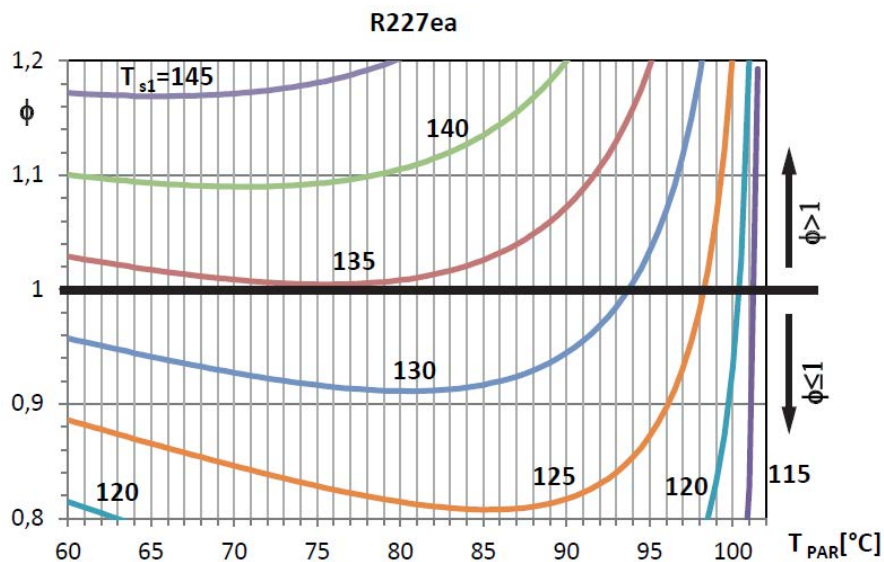
## WNIOSKI

Z przedstawionych wykresów wyraźnie widać, że zakres pracy siłowni (przypadek  $\phi \leq 1$  oraz  $\phi > 1$ ) uzależniony jest od rodzaju czynnika w obiegu ORC siłowni, temperatury zasilającej parowacz  $T_{s1}$ , podgrzewacz  $T_{s2}$  oraz temperatury parowania. Analizując



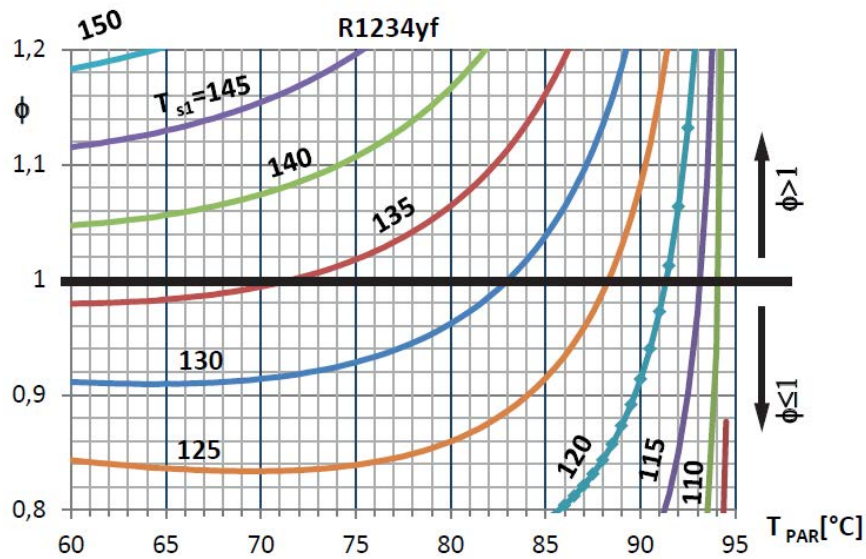
Rys. 5. Zmienność współczynnika  $\phi$  w funkcji temperatury parowania  $T_{PAR}$  dla czynnika RC318 oraz temperatur wody zasilającej parowacz  $T_{s1}$  (zakres  $\phi = 0,8-1,2$ )

Fig. 5. The variability of the coefficient  $\phi$  as a function of the evaporating temperature  $T_{PAR}$  for the organic working fluid RC318 and temperature of the feed water evaporator  $T_{s1}$  (range  $\phi = 0,8-1,2$ )



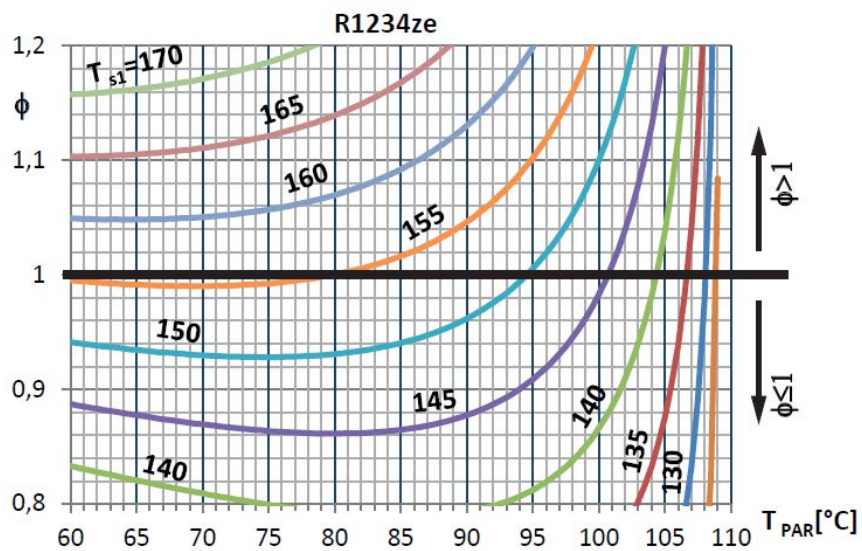
Rys. 6. Zmienność współczynnika  $\phi$  w funkcji temperatury parowania  $T_{PAR}$  dla czynnika R227ea oraz temperatur wody zasilającej parowacz  $T_{s1}$  (zakres  $\phi = 0,8-1,2$ )

Fig. 6. The variability of the coefficient  $\phi$  as a function of the evaporating temperature  $T_{PAR}$  for the organic working fluid R227ea and temperature of the feed water evaporator  $T_{s1}$  (range  $\phi = 0,8-1,2$ )



Rys. 7. Zmienność współczynnika  $\phi$  w funkcji temperatury parowania  $T_{PAR}$  dla czynnika R1234yf oraz temperatury wody zasilającej parowacz  $T_{s1}$  (zakres  $\phi = 0,8-1,2$ )

Fig. 7. The variability of the coefficient  $\phi$  as a function of the evaporating temperature  $T_{PAR}$  for the organic working fluid R1234yf and temperature of the feed water evaporator  $T_{s1}$  (range  $\phi = 0,8-1,2$ )



Rys. 8. Zmienność współczynnika  $\phi$  w funkcji temperatury parowania  $T_{PAR}$  dla czynnika R1234ze oraz temperatury wody zasilającej parowacz  $T_{s1}$  (zakres  $\phi = 0,8-1,2$ )

Fig. 8. The variability of the coefficient  $\phi$  as a function of the evaporating temperature  $T_{PAR}$  for the organic working fluid R1234ze and temperature of the feed water evaporator  $T_{s1}$  (range  $\phi = 0,8-1,2$ )



wariant pracy elektrowni hybrydowej (przypadek  $\phi > 1$ ) w całym zakresie, wartości temperatur parowania jesteśmy w stanie uzyskać tylko i wyłącznie dla określonych temperatur wody zasilającej parowacz, których wartość zależy od rodzaju czynnika ORC w obiegu siłowni. I tak dla przykładu dla czynnika R227ea minimalna wartość temperatury wody w parowaczu, umożliwiającą ten wariant pracy elektrowni, wynosi  $135^{\circ}\text{C}$ , dla RC318 –  $145^{\circ}\text{C}$ , dla R1234yf – około  $137^{\circ}\text{C}$ , a dla R1234ze – około  $156^{\circ}\text{C}$ . Praca elektrowni w tym zakresie możliwa jest również dla niższych temperatur parowacza  $T_{s1}$ , ale może wystąpić tylko i wyłącznie dla temperatur parowania bliskich wartości podkrytycznej, np. dla czynnika R227ea w zakresie  $T_{PAR} = 90\text{--}103^{\circ}\text{C}$  osiągniemy zakres pracy  $\phi > 1$  dla  $T_{s1} < 130^{\circ}\text{C}$ , zaś dla R1234ze w zakresie  $T_{PAR} = 85\text{--}108^{\circ}\text{C}$  osiągniemy zakres pracy  $\phi > 1$  dla  $T_{s1} < 155^{\circ}\text{C}$ .

Wykonane obliczenia i ich analiza mogą być pomocne do wyboru odpowiedniego rodzaju czynnika ORC w siłowni, w zależności od tego, jaki wariant pracy siłowni będzie stosowany (przypadek  $\phi \leq 1$  oraz  $\phi > 1$ ).

## LITERATURA

- MAZUREK R., NOWAK W., BORSUKIEWICZ-GOZDUR A., 2013 — Ocena wpływu charakterystyki parowacza na efektywność pracy elektrowni z jednoobiegową klasyczną siłownią ORC zasilaną wodą geotermalną. *Ciepłne Maszyny Przepływowe*, No. 143, pp. 137–146.
- NOWAK W. i in. 2012 — Analiza i ocena wpływu blisko-krytycznych warunków wrzenia czynników obiegowych na poprawę efektywności pracy elektrowni geotermalnej. *Sprawozdanie z projektu badawczego NN513393436*. Szczecin.

## THE USE AREA OF A ONE CYCLE SUBCRITICAL ORC POWER PLANT WITH GEOTHERMAL WATER APPLIED FROM ONE AND TWO HEAT SOURCES

### ABSTRACT

The paper discusses the solutions for an organic power plant using a one cycle subcritical power plant with dry working fluid. The power plant is supplied with geothermal water. The power station may be used not only in a power plant but also in a heat power plant. The indicator  $\phi$  was introduced to determine the validity of its application in one of the two mentioned cases. The indicator is defined to be a ratio of a mass water flux  $\dot{m}_{s1}$ , flowing through a countercurrent heat exchanger in which a working fluid is warmed up in the range of condensing and evaporating temperatures, to a mass water flux  $\dot{m}_s$  leaving an evaporator according to  $\phi = \dot{m}_{s1} / \dot{m}_s$ . A mass flow rate  $\dot{m}_s$  of a known temperature  $T_{s1}$  heated in the heat exchanger, which is the upper heat source, is assumed

to be known. The calculations were performed for four working fluids (R227ea, RC318, R1234yf and R1234ze) for various evaporating temperatures taking near subcritical temperatures for chosen temperatures of the feeding water into consideration. Graphs was plotted for the range of a one cycle power plant.

### **KEYWORDS**

ORC power plant, geothermal water, dry working fluid