

Układ trójbiegowej siłowni ORC

Przedmiotem wynalazku jest układ trójbiegowej siłowni ORC pracującej jako elektrownia lub elektrociepłownia.

Powszechnie znane są siłownie organiczne ORC z niskowrzącymi czynnikami obiegowymi oraz siłownie binarne z organicznym czynnikiem roboczym o dwóch obiegach – dolnym i górnym. Z polskiego opisu patentowego PL 212830 znany jest sposób zwiększania mocy siłowni ORC z czynnikiem organicznym, którego istotą jest zwiększenie wartości strumienia masowego czynnika roboczego krążącego w obiegu siłowni ORC. Zwiększenie tego strumienia jest wynikiem zastosowania zawracania strumienia nośnika ciepła z przewodu wylotowego bezpośrednio za parowaczem do przewodu dolotowego przed parowaczem. Z opisu patentowego PL 205383 znany jest sposób zagospodarowania nisko i średniotemperaturowych źródeł oraz nośników ciepła poprzez wykorzystanie ich energii do podgrzania czynnika roboczego w obiegu dolnym elektrowni binarnej zawierającej dwa obiegi robocze sprzężone termicznie ze sobą co najmniej jednym wymiennikiem ciepła. Jako czynnik roboczy w obiegu dolnym stosuje się substancje organiczne, dla których przy danej temperaturze odparowania entalpia parowania ma małą wartość, natomiast entalpia podgrzewania ma stosunkowo dużą wartość. Do podgrzania, odparowania i przegrzania czynnika roboczego w obiegu górnym stosuje się wysokotemperaturowe źródło ciepła. Z opisu patentowego PL210568 znana jest siłownia parowa z wieloźródłowym zasilaniem zawierająca trzy obiegi czynników roboczych. Pierwszy, zbudowany z kotła, turbogeneratorskiego, wymiennika typu skraplacz-parowacz, pompy. Drugi, składający się z wymiennika typu skraplacz-parowacz podgrzewacza, pompy, turbogeneratorskiego, wymiennika typu skraplacz-parowacz. Trzeci obieg o najniższym zakresie temperatur pracy, sprzężony cieplnie z drugim obiegiem roboczym poprzez wymiennik skraplacz-parowacz. Trzeci obieg zbudowany jest z podgrzewacza, wymiennika typu skraplacz/parowacz, turbogeneratorskiego, skraplacza, pompy. Trzeci obieg może być sprzężony cieplnie poprzez skraplacz-podgrzewacz-parowacz i wtedy zbudowany jest z wymiennika typu skraplacz-podgrzewacz-parowacz, zaworu rozprężnego, skraplacza, pompy.

Układ trójbiegowej siłowni ORC, według wynalazku, zawiera trzy obiegi Clausiusa-Rankine'a, przy czym każdy obieg zawiera turbogenerator, podgrzewacz,

wymiennik typu skraplacz-parowacz, pompę obiegową, a obieg trzeci zawiera skraplacz. W obiegu drugim rolę skraplacza pełni trzeci wymiennik typu skraplacz-parowacz, a w obiegu pierwszym rolę skraplacza pełni drugi wymiennik typu skraplacz-parowacz. Obieg drugi sprzężony jest cieplnie z pierwszym obiegiem drugim wymiennikiem typu skraplacz-parowacz, a z trzecim obiegiem trzecim wymiennikiem typu skraplacz-parowacz, zaś pierwszy obieg połączony jest ze źródłem ciepła. Istota wynalazku polega na tym, że obieg pierwszy, przed pierwszym turbogeneratorem, ma pierwszy podgrzewacz i pierwszy wymiennik typu skraplacz-parowacz, który połączony jest ze źródłem nasyconej pary suchej oraz z drugim i trzecim podgrzewaczem. Nasycona sucha para po skropleniu w pierwszym wymienniku typu skraplacz-parowacz, kierowana jest w kolejności do pierwszego, drugiego i trzeciego podgrzewacza.

W przypadku układu pracującego jako elektrociepłownia źródło nasyconej pary suchej połączone jest również z odbiornikiem technologicznym.

Korzystnie jest, gdy układ ma odbiornik technologiczny połączony ze źródłem nasyconej pary suchej, pierwszym wymiennikiem typu skraplacz-parowacz i pierwszym podgrzewaczem. Zastosowanie wymiennika technologicznego znacznie zwiększa sprawność układu. W przypadku elektrociepłowni, podobnie jak dla elektrowni, para wodna skroplona w pierwszym wymienniku typu skraplacz-parowacz oraz w wymienniku technologicznym kierowana jest w kolejności do pierwszego, drugiego i trzeciego podgrzewacza.

Do pierwszego wymiennika typu skraplacz-parowacz, w przypadku elektrowni i elektrociepłowni i odbiornika technologicznego, w przypadku elektrociepłowni doprowadzona jest nasycona para wodna, przy czym źródłem tej pary może być dowolne źródło np. para upustowa z układu elektrowni parowej, czy też para wydobywana z głębi ziemi - wtedy wykorzystujemy energię geotermalną.

W przypadku, gdy wymagane masowe strumienie skroplin przepływające przez poszczególne podgrzewacze obiegów siłowni ORC, zarówno dla elektrowni jak i elektrociepłowni nie są sobie równe, należy do pierwszego podgrzewacza (obiegu pierwszego), drugiego (obiegu drugiego) i trzeciego (obiegu trzeciego) w przypadku elektrowni, a w przypadku elektrociepłowni do drugiego podgrzewacza i trzeciego doprowadzać dodatkowy strumień wody z dodatkowych źródeł ciepła. Układ taki daje

możliwość zagospodarowania niskotemperaturowych strumieni energii, których nośnikiem jest woda.

W elektrowni pierwszy podgrzewacz połączony jest z pierwszym źródłem ciepła, drugi podgrzewacz połączony jest z drugim źródłem ciepła, a trzeci podgrzewacz połączony jest z trzecim źródłem ciepła. W elektrociepłowni nie ma konieczności stosowania dodatkowego źródła pierwszego, ponieważ dodatkowy strumień skroplin doprowadzany jest z odbiorników technologicznych.

W przypadku, gdy w układzie nie ma odbiorników technologicznych mamy wtedy do czynienia z elektrownią, gdzie produkowana jest wyłącznie energia elektryczna. Uwzględnienie w układzie odbiorników technologicznych sprawia, że w całym układzie wytwarzana jest energia w skojarzeniu (produkcja energii cieplnej i elektrycznej).

Korzystnie jest, gdy ze źródła ciepła do układu doprowadzana jest energia w postaci strumienia masowego pary wodnej nasyconej suchej. Przykładowo źródło nasyconej suchej pary wodnej może stanowić kocioł parowy generujący parę o temperaturze 120°C, co odpowiada ciśnieniu około 2 barów. Kocioł może być też zasilany biomasą, która stanowi odnawialny nośnik energii.

Istotą działania omówionego poniżej układu trójbiegowej siłowni ORC, pracującej jako elektrownia lub elektrociepłownia, jest zastosowanie odpowiednio połączonych wymienników typu skraplacz-parowacz, w których skraplający się nośnik ciepła ma wielokrotnie większą entalpię właściwą skraplania, od entalpii właściwej parowania czynnika obierającego to ciepło skraplania. Taka relacja pomiędzy entalpiami skraplania i parowania powoduje zwiększenie strumienia masowego odparowującego czynnika, co w konsekwencji przekłada się na zwiększenie mocy układu. Zwiększenie strumienia masowego czynnika krążącego w obiegach ORC powoduje także wzrost zapotrzebowania strumienia masowego cieczy podgrzewającej czynnik roboczy w podgrzewaczach. To z kolei pozwala na zagospodarowanie dodatkowych strumieni energii np. w postaci strumieni wody z nisko i średniotemperaturowych odpadowych źródeł energii.

Zaletą rozwiązania jest to, że para wodna nasycona sucha, produkowana w kotle jest wykorzystywana do zasilania technologicznych odbiorników ciepła oraz do wytwarzania energii elektrycznej w układzie siłowni organicznej ORC składającej się z trzech sprzężonych cieplnie obiegów Clausiusa-Rankine'a. Zastosowanie w układzie

doprowadzenia pary nasyconej suchej pozwala na zastosowanie wymiennika w pierwszym obiegu jako pierwszego wymiennika typu skraplacz-parowacz.

Rozwiązanie według wynalazku opisane jest w przykładach wykonania i na rysunku, gdzie Fig. 1 przedstawia schemat trójobiegowej siłowni ORC zasilanej parą nasyconą suchą, pracującej jako elektrownia, Fig. 2 przedstawia schemat trójobiegowej siłowni ORC zasilanej parą nasyconą suchą z trzema dodatkowymi źródłami ciepła, pracującej jako elektrownia, Fig. 3 przedstawia schemat trójobiegowej siłowni ORC zasilanej parą nasyconą suchą, pracującej jako elektrociepłownia przy uwzględnieniu potrzeb na cele technologiczne, a Fig. 4 przedstawia cykl przemian termodynamicznych dla trójobiegowej siłowni ORC .

Przykład I

Układ trójobiegowej siłowni ORC, pracującej jako elektrownia, której pierwszy obieg zawiera pierwszy wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.1, pierwszy turbogenerator 2.1, drugi wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.2, pierwszą pompę obiegową 3.1 oraz pierwszy podgrzewacz 4.1. Drugi obieg zawiera drugi turbogenerator 2.2, trzeci wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.3, drugą pompę obiegową 3.2, drugi podgrzewacz 4.2 i drugi wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.2, który zapewnia sprzężenie cieplne pomiędzy pierwszym a drugim obiegiem. Trzeci obieg zawiera trzeci turbogenerator 2.3, skraplacz 5, trzecią pompę obiegową 3.3, trzeci podgrzewacz 4.3 oraz trzeci wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.3, który zapewnia sprzężenie cieplne pomiędzy trzecim a drugim obiegiem. Skraplacz 5 obiegu trzeciego chłodzony jest np. wodą z rzeki. Pierwszy wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.1 połączony jest z kotłem parowym 6 lub innym źródłem pary nasyconej suchej.

Do pierwszego wymiennika typu skraplacz-parowacz 1.1 doprowadzona jest nasycona para wodna z kotła parowego 6, a do pierwszego 4.1, drugiego 4.2 i trzeciego 4.3 podgrzewacza doprowadzona jest skroplona para wodna.

Przykład II

Układ trójobiegowej siłowni ORC jak w przykładzie I, przy czym dodatkowo pierwszy podgrzewacz 4.1, drugi 4.2 i trzeci 4.3 są zasilane dodatkowymi strumieniami wody odpowiednio ze źródła pierwszego 7.1, drugiego 7.2 i trzeciego 7.3.

Przykład III

Układ trójbiegowej siłowni ORC, pracującej jako elektrociepłownia której pierwszy obieg zawiera pierwszy wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.1, pierwszy turbogenerator 2.1, drugi wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.2, pierwszą pompę obiegową 3.1 oraz pierwszy podgrzewacz 4.1. Drugi obieg zawiera drugi turbogenerator 2.2, trzeci wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.3, drugą pompę obiegową 3.2, drugi podgrzewacz 4.2 i drugi wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.2, który zapewnia sprzężenie cieplne pomiędzy pierwszym a drugim obiegiem. Trzeci obieg zawiera trzeci turbogenerator 2.3, skraplacz 5, trzecią pompę obiegową 3.3, trzeci podgrzewacz 4.3 oraz trzeci wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.3, który zapewnia sprzężenie cieplne pomiędzy trzecim a drugim obiegiem. Skraplacz 5 obiegu trzeciego chłodzony jest np. wodą z rzeki. Pierwszy wymiennik typu skraplacz-parowacz 1.1 połączony jest z kotłem parowym 6, połączonym również z odbiornikiem technologicznym 8.

Do pierwszego wymiennika typu skraplacz-parowacz 1.1 i odbiornika technologicznego 8 doprowadzona jest nasycona para wodna z kotła parowego 6, a do pierwszego 4.1, drugiego 4.2 i trzeciego 4.3 podgrzewacza doprowadzona jest skroplona para wodna.

Siłownia działa tak, że wytworzona w kotle 6 para, po rozdzieleniu na dwa strumienie masowe kierowana jest do odbiorników technologicznych 8 oraz do układu trójbiegowej siłowni ORC.

Strumień pary kierowanej do odbiorników technologicznych 8 oznaczono przez \dot{m}_p^t , natomiast strumień pary kierowanej do siłowni ORC oznaczono przez \dot{m}_p^e . Strumienie te spełniają następujący warunek:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_p^t + \dot{m}_p^e$$

W odbiorniku technologicznym 8 następuje odbieranie ciepła od strumień pary \dot{m}_p^t , co powoduje jej skroplenie. Skropliny (woda w stanie nasycenia) z odbiornika technologicznego 7 wraz ze skroplinami z pierwszego wymiennika typu skraplacz-parowacz 1.1 obiegu pierwszego, kierowane są do pierwszego podgrzewacza 4.1 obiegu pierwszego trójbiegowej siłowni ORC. W pierwszym wymienniku typu skraplacz-parowacz 1.1 obiegu pierwszego następuje skroplenie pary wodnej doprowadzanej z kotła 6, natomiast od strony obiegu ORC następuje odparowanie czynnika roboczego. Uzyskana w ten sposób para czynnika roboczego kierowana jest do pierwszego turbogeneratorsa 2.1 obiegu pierwszego. Po opuszczeniu pierwszej turbiny pierwszego turbogeneratorsa 2.1 para ta kierowana jest do drugiego wymiennika typu skraplacz-

parowacz 1.2, który stanowi sprzężenie cieplne obiegu pierwszego z obiegiem drugim. W wymienniku 1.2 tym od strony obiegu pierwszego następuje skroplenie czynnika roboczego, natomiast od strony obiegu drugiego następuje odparowanie cieczy roboczej obiegu drugiego. Uzyskana w tym wymienniku 1.2 para czynnika roboczego obiegu drugiego kierowana jest do drugiego turbogeneratorsa 2.2, w którym następuje jej rozprężenie. Z drugiego turbogeneratorsa 2.2 obiegu drugiego para kierowana jest do trzeciego wymiennika typu skraplacz-parowacz 1.3, który jest elementem łączącym obieg drugi z obiegiem trzecim. W wymienniku 1.3 tym skraplająca się para czynnika roboczego obiegu drugiego powoduje odparowanie cieczy roboczej obiegu trzeciego. W obiegu trzecim, analogicznie jak w obiegu pierwszym i drugim, wytworzona para rozprężana jest w turbinie trzeciego turbogeneratorsa 2.3. Po rozprężeniu para kierowana jest do skraplacza 5 obiegu trzeciego.

W każdym z obiegów, czynnik po skropleniu jest przetłaczany do podgrzewaczy pierwszego 4.1, drugiego 4.2 i trzeciego 4.3 za pomocą odpowiednio pierwszej pompy obiegowej 3.1, drugiej 3.2 i trzeciej 3.3.

Parametry termiczne i kaloryczne czynników zestawione w obliczeniach odczytano z bazy czynników niskowrzących REFPROP 9.0. Temperatury zostały tak dobrane, żeby w obiegu pierwszym temperatura skraplania była wyższa o 3K od temperatura parowania w kolejnym obiegu.

Ponieważ w rozpatrywanej trójobiegowej siłowni masowy strumień wody sieciowej przepływającej przez pierwszy podgrzewacz 4.1 w pierwszym obiegu jest mniejszy niż strumień wody sieciowej przepływającej przez drugi podgrzewacz 4.2 w drugim obiegu, a w drugim mniejszy niż w trzecim, w związku z tym do tych podgrzewaczy 4.2 i 4.3 doprowadzono odpowiednio brakujące strumienie wody z dodatkowych źródeł ciepła pierwszego 7.2 i drugiego 7.3.

W obiegu pierwszym zastosowano czynnik R236ea, w obiegu drugim zastosowano czynnik Perfluorobutan, a w obiegu trzecim zastosowano czynnik R218.

OBIEG PIERWSZY

$$T_{\text{par}}=117[^\circ\text{C}]$$

$$T_{\text{skr}}=90[^\circ\text{C}]$$

Tab.1. Termiczne i kaloryczne parametry stanu punktów porównawczych obiegu Clausiusa-Rankine'a dla czynnika R2 dla temp. skraplania 90°C i temp. parowania 117°C.

T_{par}	Punkty	T	p	h	s
[°C]		[°C]	bar	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	$\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
117	1	117	22,337	441,55	1,6874
	2s	92,946	12,640	433,56	1,6874
	2	90	12,640	430,01	
	3	90	12,640	318,03	1,3693
	4s	90,886	22,337	318,84	1,3693
	5	117	22,337	359,98	

-jednostkowa praca w turbinie:

$$l_{rozpr}^1 = h_1^1 - h_{2s}^1 = 441,55 - 433,56 = 7,99 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

- jednostkowa praca pompy w obiegu ORC:

$$l_{spr}^1 = h_{4s}^1 - h_3^1 = 318,84 - 318,03 = 0,81 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

- jednostkowa praca obiegu Clausiusa-Rankine'a

$$l_{C-R}^1 = l_{rozpr}^1 - l_{spr}^1 = 7,99 - 0,81 = 7,18 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\Delta h_{par} = h_1 - h_5 = 441,55 - 359,98 = 81,57 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\Delta h_{pod} = h_5 - h_{4s} = 359,98 - 318,84 = 41,14 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\Delta h_{skr} = h_{2s} - h_3 = 433,56 - 318,03 = 115,53 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Przyjęto, że stopień suchości pary wynosi $x_2 = 1$, a strumień pary nasyconej suchej doprowadzony do elektrowni wynosi $\dot{m}_p^e = 0,4 \left[\frac{kg}{s}\right]$, a strumień pary doprowadzanej do

wymienników technologicznych wynosi $\dot{m}_p^t = 3,62 \left[\frac{kg}{s}\right]$

- strumień masowy pary nasyconej suchej opuszczający kocioł \dot{m}_p

$$\dot{m}_p = \dot{m}_p^t + \dot{m}_p^e$$

- strumień masowy czynnika roboczego:

$$\dot{m}^1 = \frac{\dot{m}_p^e (h'' - h')}{h_1^1 - h_5^1}$$

$$\dot{m}^1 = \frac{0,4 \times 2202,09}{441,55 - 359,98} = 10,80 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

- strumień masowy wody zasilającej podgrzewacz:

$$\dot{m}_{s1}^1 = \dot{m}^1 \frac{(h_5^1 - h_{4s}^1)}{h_{s1}^1(T_{s1}^1) - h_{s4s}^1(T_{s4s}^1)}$$

$$\dot{m}_{s1}^1 = 10,80 \frac{359,98 - 318,84}{503,81 - 393,40} = 4,02 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

- równanie bilansu skraplacz-parowacz

$$\dot{Q}_{s-p}^{p1} = \dot{m}_p^e (h'' - h') = 0,4(2705,9 - 503,81) = 880,84 \text{ [kW]}$$

- równanie bilansu podgrzewacza:

$$\dot{Q}_{pod}^1 = \dot{m}_{s1}^1 [h_{s1}^1(T_{s1}^1) - h_{s2s}^1(T_{s2s} = T_{4s}^1 + \Delta T_{2s}^1)] = \dot{m}^1 [h_5^1(T_5^1) - h_{4s}^1(T_{4s}^1)]$$

$$\dot{Q}_{pod}^1 = 4,02[503,81 - 393,40] = 443,85 \text{ [kW]}$$

OBIEG DRUGI

$$T_{par} = 87 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{skr} = 60 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tab.2. Termiczne i kaloryczne parametry stanu punktów porównawczych obiegu Clausiusa-Rankine'a dla czynnika Perfluorobutan dla temp. skraplania 60°C i temp. parowania 87°C.

T_{par}	Punkty	T	p	h	s
[°C]		[°C]	bar	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$
87	1	87	13,607	155,63	0,46967
	2s	70,603	7,2654	149,97	0,46967
	2	60	7,2654	139,63	
	3	60	7,2654	68,30	0,22501
	4s	60,525	13,607	68,77	0,22501
	5	87	13,607	101,86	

$$T_{s1}^2 = T_{4s}^1 + 3K = 90,886 + 3K = 93,886 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$l_{rozpr}^2 = h_1^2 - h_{2s}^2 = 155,63 - 149,97 = 5,66 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$l_{spr}^2 = h_{4s}^2 - h_3^2 = 68,77 - 68,30 = 0,47 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$l_{C-R}^2 = l_{rozpr}^2 - l_{spr}^2 = 5,66 - 0,47 = 5,19 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$\Delta h_{par} = h_1 - h_5 = 155,63 - 101,86 = 53,77 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$\Delta h_{pod} = h_5 - h_{4s} = 101,86 - 68,77 = 33,09 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$\Delta h_{skr} = h_{2s} - h_3 = 149,97 - 68,30 = 81,67 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$\dot{m}^2 = \dot{m}^1 \frac{h_{2s}^1 - h_3^1}{h_1^1 - h_5^1}$$

$$\dot{m}^2 = 10,80 \frac{433,56 - 318,03}{155,63 - 101,86} = 23,20 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_{s1}^2 = \dot{m}^2 \frac{(h_5^2 - h_{4s}^2)}{h_{s1}^2(T_{s1}^2) - h_{s4s}^2(T_{s4s}^2)}$$

$$\dot{m}_{s1}^2 = 23,20 \frac{101,86 - 68,77}{393,40 - 265,94} = 6,02 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_{s1}^1 - \dot{m}_{s1}^2 = 4,02 - 6,02 = -2,00 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Strumień masowy wody zasilającej podgrzewacz w obiegu drugim jest większy o $2,26 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ niż w obiegu pierwszym. Oznacza to, że musimy doprowadzić do obiegu drugiego dodatkowo tą różnicę.

$$\dot{Q}_{S-P}^{p2} = \dot{m}^1(h_{2s}^1 - h_3^1) = \dot{m}^2(h_1^2 - h_5^2)$$

$$\dot{Q}_{S-P}^{p2} = 10,80(433,56 - 318,03) = 1247,72 \text{ [kW]}$$

$$\dot{Q}_{pod}^2 = \dot{m}_{s1}^2[h_{s1}^2(T_{s1}^2) - h_{s4s}^2(T_{s4s}^2)] = \dot{m}^2(h_5^2 - h_{4s}^2)$$

$$\dot{Q}_{pod}^2 = 6,02[393,40 - 265,94] = 767,31 \text{ [kW]}$$

Dodatkowy strumień ciepła w podgrzewaczu obiegu drugiego:

$$\dot{Q}_z^2 = (\dot{m}_{s1}^2 - \dot{m}_{s1}^1)[h_{s1}^2(T_{s1}^2) - h_{s4s}^2(T_{s4s}^2)] = (6,02 - 4,02)[393,40 - 265,94] = 254,92 \text{ [kW]}$$

OBIEG TRZECI

$$T_{par}=57[^\circ\text{C}]$$

$$T_{skr}=29[^\circ\text{C}]$$

Tab.3. Termiczne i kaloryczne parametry stanu punktów porównawczych obiegu Clausiusa-Rankine'a dla czynnika R218 dla temp. skraplania 29°C i temp. parowania 57°C.

T_{par}	Punkty	T	p	h	s
[°C]		[°C]	bar	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	$\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
57	1	57	18,988	316,69	1,3690
	2s	33,325	9,6476	310,30	1,3690
	2	29	9,6476	306,02	
	3	29	9,6476	232,65	1,1121
	4s	29,859	18,988	233,36	1,1121
	5	57	18,988	268,85	

$$T_{s1}^3 = T_{4s}^2 + 3K = 60,525 + 3K = 63,525 \text{ [°C]}$$

$$l_{rozpr}^3 = h_1^3 - h_{2s}^3 = 316,69 - 310,30 = 6,39 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$l_{spr}^3 = h_{4s}^3 - h_3^3 = 233,36 - 232,65 = 0,71 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$l_{C-R}^3 = l_{rozpr}^3 - l_{spr}^3 = 6,39 - 0,71 = 5,68 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\Delta h_{par} = h_1 - h_5 = 316,69 - 268,85 = 47,84$$

$$\Delta h_{pod} = h_5 - h_{4s} = 268,85 - 233,36 = 35,49$$

$$\Delta h_{skr} = h_{2s} - h_3 = 310,30 - 232,65 = 77,65 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$\dot{m}^3 = \dot{m}^2 \frac{h_{2s}^2 - h_3^2}{h_1^3 - h_5^3}$$

$$\dot{m}^3 = 23,20 \frac{149,97 - 68,30}{316,69 - 268,85} = 39,61 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

$$\dot{m}_{s1}^3 = \dot{m}^3 \frac{(h_5^3 - h_{4s}^3)}{h_{s1}^3 (T_{s1}^3) - h_{s4s}^3 (T_{s4s}^3)}$$

$$\dot{m}_{s1}^3 = 39,61 \frac{268,85 - 233,36}{265,94 - 137,68} = 10,96 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

$$\dot{m}_{s1}^2 - \dot{m}_{s1}^3 = 6,02 - 10,96 = -4,94 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Strumień masowy wody zasilającej podgrzewacz w obiegu trzecim jest większy o $4,94 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ niż w obiegu drugim. Oznacza to, że musimy doprowadzić do obiegu trzeciego dodatkowo tą różnicę.

$$\dot{Q}_{S-P}^{p3} = \dot{m}^2 (h_{2s}^2 - h_3^2) = \dot{m}^3 (h_1^3 - h_5^3)$$

$$\dot{Q}_{S-P}^{p3} = 23,20(149,97 - 68,30) = 1894,74 \text{ [kW]}$$

$$\dot{Q}_{pod}^3 = \dot{m}_{s1}^3 [h_{s1}^3(T_{s1}^3) - h_{s4s}^3(T_{s4s}^3)] = \dot{m}^3 (h_5^3 - h_{4s}^3)$$

$$\dot{Q}_{pod}^3 = 10,96[265,94 - 137,68] = 1405,73 \text{ [kW]}$$

Dodatkowy strumień ciepła doprowadzony w podgrzewaczu obiegu trzeciego:

$$\dot{Q}_z^3 = (\dot{m}_{s1}^3 - \dot{m}_{s1}^2) [h_{s1}^3(T_{s1}^3) - h_{s4s}^3(T_{s4s}^3)] = (10,96 - 6,02)[265,94 - 137,68] = 633,60 \text{ [kW]}$$

Parametry siłowni trójobiegowej:

Ciepło doprowadzone: suma ciepła doprowadzonego w wymienniku typu skraplacz-parowacz obiegu górnego oraz w wymiennikach typu podgrzewacz):

$$\dot{Q}_d = \dot{Q}_{S-P}^{p1} + \dot{Q}_{pod}^1 + \dot{Q}_{pod}^2 + \dot{Q}_{pod}^3 = 880,84 + 443,85 + 767,31 + 1405,73 = 3497,73 \text{ [kW]}$$

Moc obiegu:

$$N_{C-R} = N_{C-R}^1 + N_{C-R}^2 + N_{C-R}^3 = 77,54 + 120,41 + 224,98 = 422,93$$

Sprawność obiegu:

$$\eta_{C-R} = \frac{N_{C-R}}{\dot{Q}_d} = \frac{422,93}{3497,73} = 0,121$$

Sprawność dla elektrociepłowni (z uwzględnieniem wymienników technologicznych:

$$\eta_{C-R} = \frac{\dot{Q}_t + N_{C-R}}{\dot{Q}_p} = \frac{\dot{Q}_t + N_{C-R}}{\dot{Q}_t + \dot{Q}_d} = \frac{7971,6 + 422,93}{7971,6 + 3497,73} = 0,732$$