



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Kornelia Banasik

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

ELEKTROENERGETYKA

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

*Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23*



Spis treści

1. Wykaz użytych oznaczeń	3
2. Podstawowe definicje	4
3. Elektrownie konwencjonalne	6
4. Obiegi termodynamiczne elektrowni konwencjonalnej (parowej)	7
4.1. Obieg Rankine'a	7
4.2. Obieg Rankine'a z międzystopniowym przegrzewaniem pary	13
4.2.1. Przykładowe obliczenia	14
4.3. Obieg z jednostopniowym przegrzewaniem pary i jednostopniowym regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej w podgrzewaczu mieszkankowym	19
5. Literatura	25
6. Załączniki	26



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Wykaz użytych oznaczeń

i_1 – entalpia pary na wlocie do turbiny, [kJ/kg];

i_2 – entalpia rzeczywista na wylocie z turbiny, [kJ/kg];

i_{2a} – entalpia przy rozprężaniu adiabatycznym, [kJ/kg];

i_{wz} – entalpia wody zasilającej, [kJ/kg];

i_{sk} – entalpia skroplin, [kJ/kg];

i_{m1} – entalpia pary na wylocie z przegrzewacza międzystopniowego, [kJ/kg];

i_u – entalpia pary upustowej, [kJ/kg];

Δi_m – przyrost entalpii pary w przegrzewaczu międzystopniowym, [kJ/kg];

t_1 – temperatura pary na wlocie do turbiny, [°C];

t_2 – temperatura pary na wylocie z turbiny, [°C];

t_m – temperatura pary na wylocie z przegrzewacza międzystopniowego, [°C];

t_{wz} – temperatura wody zasilającej, [°C];

p_1 – ciśnienie pary na wlocie do turbiny, [MPa];

p_2 – ciśnienie pary na wylocie z turbiny, [MPa];

p_m – ciśnienie międzystopniowego przegrzewu, [MPa];

p_u – ciśnienie pary upustowej, [MPa];

x – stopień suchości pary mokrej, [-];

c_w – masowe ciepło właściwe wody (przyjęto: $c_w = 4,186 [kJ / (kg \cdot ^\circ C)]$)

ε – udział zużycia energii elektrycznej na potrzeby własne, [-];

η – sprawność, [-];

η_{eb} – sprawność elektrowni brutto, [-]

η_{en} – sprawność elektrowni netto, [-]

η_g – sprawność generatora, [-];

η_m – sprawność mechaniczna turbiny, [-];

η_{mg} – sprawność mechaniczna i generatora, [-];

η_r – sprawność rurociągów, [-];

η_k – sprawność kotła, [-];

η_w – sprawność wewnętrzna turbiny, [-];

η_{w1} – sprawność wewnętrzna turbiny (część wysokoprężna), [-];

η_{w2} – sprawność wewnętrzna turbiny (część niskoprężna), [-];

η_{rz} – sprawność rzeczywista obiegu, [-];



η_t – sprawność teoretyczna obiegu, [-];

P_g – moc elektryczna prądnicy (generatora), [MW];

W_r – wartość opałowa paliwa, [MJ/kg];

W_u – wartość opałowa paliwa umownego, [MJ/kg];

D_p – strumień masy pary, [kg/s];

b – jednostkowe zużycie paliwa, [kJ/(kW·h)];

u – udział upustu, ilość pary z upustu, [-].

2. Podstawowe definicje

Elektroenergetyka to dziedzina, która obejmuje cały proces produkcji, przesyłu, rozdziału i użytkowania energii elektrycznej. Jej głównym celem jest zapewnienie ciągłego i niezawodnego dostarczania energii elektrycznej o wysokiej jakości.

Proces elektroenergetyki obejmuje następujące etapy:

- Wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach konwencjonalnych lub w elektrowniach niekonwencjonalnych.
- Przesył energii elektrycznej za pomocą rozbudowanych sieci przesyłowych do różnych regionów, miast i miejscowości z minimalnymi stratami i zakłóceniami.
- Rozdział energii elektrycznej, który polega na dostosowaniu ilości energii do konkretnej lokalnej potrzeby, realizowany za pomocą sieci dystrybucyjnych.
- Użytkowanie energii elektrycznej. Zapewnienie niezawodności dostaw energii elektrycznej poprzez rozbudowę infrastruktury, monitorowanie i zarządzanie siecią. Zapewnienie wysokiej jakości dostarczanej energii elektrycznej, czyli brak zakłóceń i fluktuacji napięcia oraz spełnianie standardów bezpieczeństwa i stabilności.

Entalpia i $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ – określa się ilość ciepła zawartą w 1kg czynnika roboczego. Wartość liczbową entalpii zależy od stanu fizycznego czynnika (ciecz, para nasycona, para przegrzana) oraz od parametrów wyznaczających ten stan, tj. wartość ciśnienia i temperatury.

Entropia s $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$ jest wielkością zależną od stanu czynnika. Jest jednym z parametrów określających zdolność zamiany ciepła w energię mechaniczną.



Obieg termodynamiczny jest to szereg dowolnych przemian termodynamicznych, którym podlega czynnik termodynamiczny, a stan termodynamiczny czynnika na końcu obiegu pokrywa się ze stanem na jego początku.

Obiegi termodynamiczne spełniają zasadnicze zadanie przy ocenie działania rzeczywistych urządzeń cieplnych. Dla każdego typu urządzeń działających w sposób ciągły lub okresowy i realizujących *obieg rzeczywisty*, można ustalić najkorzystniejszy odwracalny *obieg porównawczy*. Obieg taki jest idealizacją obiegu rzeczywistego realizowanego przez rzeczywistą maszynę. Obiegi porównawcze składające się z przemian charakterystycznych, nie uwzględniających np. strat ciśnienia, czy przyrostu entropii czynnika.

Przemianami charakterystycznymi, z których zwykle złożony jest obieg porównawczy (obieg Rankine'a jest obiegiem porównawczym siłowni parowej, w której proces konwersji energii odbywa się z wykorzystaniem wody i pary wodnej), są: przemiana izobaryczna, przemiana izotermiczna, przemiana izochoryczna i przemiana adiabatyczna.

Przemiana izobaryczna – proces termodynamiczny, podczas którego ciśnienie układu nie ulegnie zmianie, natomiast pozostałe parametry termodynamiczne czynnika mogą się zmieniać.

Przemiana izotermiczna – w termodynamice przemiana zachodząca przy określonej, stałej temperaturze.

Przemiana izochoryczna – proces termodynamiczny zachodzący przy stałej objętości. Oprócz objętości wszystkie pozostałe parametry termodynamiczne mogą się zmieniać.

Przemiana adiabatyczna – proces termodynamiczny, podczas którego izolowany układ nie nawiązuje wymiany ciepła, ale całość energii jest dostarczana lub odbierana z niego jako praca. Jest to idealizacja niemożliwa do zrealizowania w praktyce.

Sprawność, sprawność energetyczna – wielkość fizyczna określająca w jakim stopniu w danym procesie przekształcana jest energia jednego rodzaju w energię innego rodzaju; jest to parametr określający efektywność wykorzystania paliwa. Sprawność to stosunek ilości energii wychodzącej z procesu do ilości energii wchodzącej do procesu. Sprawność wyrażana jest w jednostkach względnych (tzn. bez tak zwanego miana), często też w zapisie procentowym (w procentach).



3. Elektrownie konwencjonalne

Elektrownie konwencjonalne wytwarzają energię elektryczną poprzez spalanie paliw kopalnych takich jak węgiel, gaz ziemny, ropa naftowa. Są one jednymi z najstarszych i najpowszechniej stosowanych typów elektrowni na świecie, szczególnie w krajach o dużych zasobach paliw kopalnych. Pełnią rolę podstawowego źródła energii w wielu systemach energetycznych. Działają w oparciu o obieg termodynamiczny (np. obieg Rankine'a), który przekształca energię cieplną w energię mechaniczną, a następnie w energię elektryczną. Sprawność elektrowni konwencjonalnych węglowych wynosi zazwyczaj 30-40% dla starszych jednostek i do 45% dla nowoczesnych bloków, a dla nowoczesnych elektrowni gazowo-parowych może sięgać do 60%.

Zalety elektrowni konwencjonalnych:

- + Wysoka niezawodność, dzięki dobrze znanej i sprawdzonej technologii.
- + Duża moc, co pozwala na dostarczanie znacznych ilości energii, stanowiąca podstawę wielu systemów energetycznych.
- + Elastyczność, czyli możliwość szybkiego dostosowania produkcji energii do zapotrzebowania.
- + Niskie koszty inwestycyjne w porównaniu do niektórych odnawialnych źródeł energii.

Wady elektrowni konwencjonalnych:

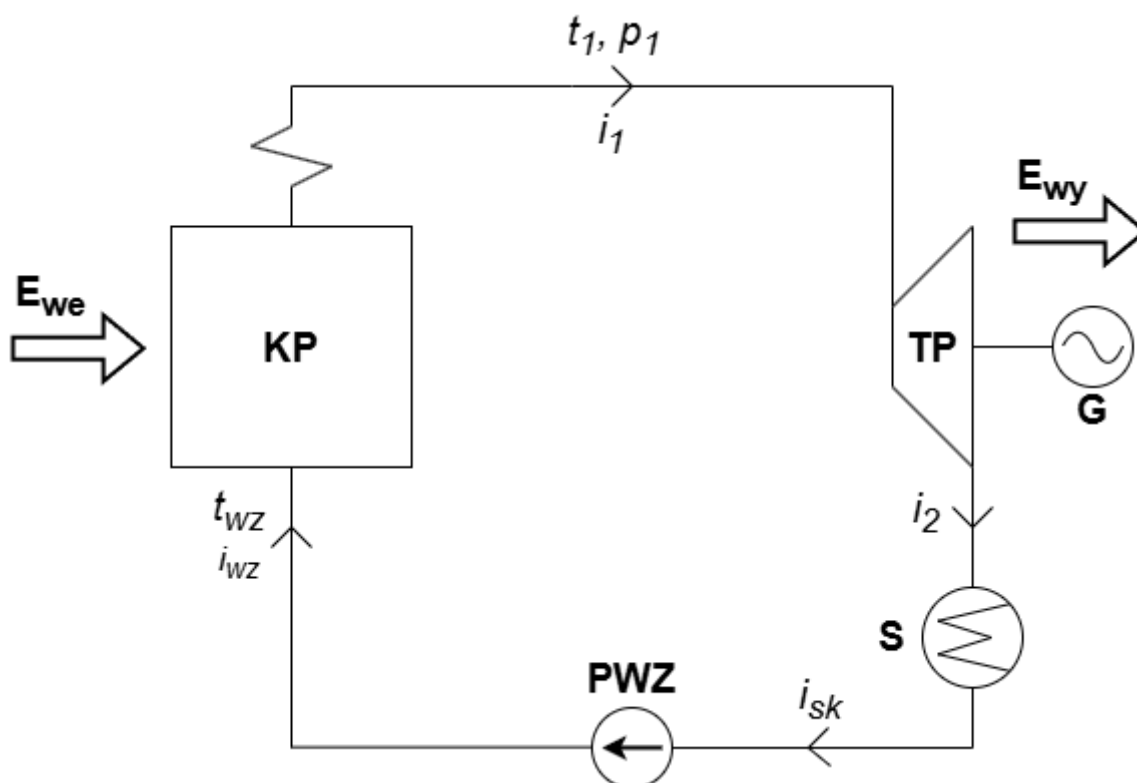
- Emisja zanieczyszczeń, takich jak CO_2 , SO_2 , NO_x oraz pyłów, co negatywnie wpływa na środowisko i zdrowie ludzi.
- Negatywny wpływ na klimat, przyczyniają się do globalnego ocieplenia poprzez emisję gazów cieplarnianych.
- Zużycie nieodnawialnych surowców pierwotnych, których zasoby są ograniczone.
- Wysokie koszty eksploatacji związane ze zmiennością cen paliw kopalnych, co wpływa na stabilność kosztów produkcji energii.

4. Obiegi termodynamiczne elektrowni konwencjonalnej (parowej)

W elektrowniach konwencjonalnych, które wykorzystują paliwa kopalne do wytwarzania energii elektrycznej, kluczową rolę odgrywają obiegi termodynamiczne. Są to procesy, które przekształcają energię cieplną w mechaniczną, a następnie w elektryczną. W zależności od technologii i potrzeb energetycznych, stosuje się różne warianty obiegów termodynamicznych, które optymalizują sprawność, redukują straty energii i minimalizują wpływ na środowisko.

4.1. Obieg Rankine'a

Obieg Rankine'a – obieg termodynamiczny, realizowany w przemianach energetycznych dokonujących się w elektrowniach i elektrociepłowniach. Jest obiegiem porównawczym dla procesów, w których zachodzi parowanie i skraplanie czynnika roboczego np. dla konwencjonalnych lub jądrowych siłowni parowych, agregatów chłodziarek i pomp ciepła.



Rys.1. Obieg Rankine'a dla elektrowni konwencjonalnej.



Układ cieplny obiegu Rankine'a składa się z kotła, w którym następuje podgrzanie i odparowanie wody oraz przegrzanie pary. Wszystkie trzy fazy zachodzą przy stałym ciśnieniu panującym w kotle. Ciepło do czynnika dostarczone jest do turbiny na skutek spalania paliwa w kotle, co sprowadza się do zamiany energii chemicznej paliwa na energię cieplną przekazywaną czynnikowi roboczemu – parze wodnej. Przegrzana para wodna rurociągiem podawana jest do turbiny parowej, w której następuje izentropowe rozprężanie pary. Podczas rozprężania energia cieplna zawarta w parze zamieniona jest na pracę mechaniczną. Dolnym źródłem ciepła jest skraplacz chłodzony wodą (w przypadku elektrowni kondensacyjnej) lub odbiornik ciepła (w przypadku elektrociepłowni). W skraplaczu lub odbiorniku ciepła para zostaje skroplona przy stałym ciśnieniu, następnie pompą wtłoczona do kotła.

Sprawność teoretyczna obiegu Rankine'a – stosunek energii użytecznej (energii wyjściowej) do energii doprowadzonej do układu (energii wejściowej).

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_{2a}}{i_1 - i_{wz}} \quad (1)$$

4.1.1. Przykładowe obliczenia

Obliczyć entalpię na wylocie z turbiny i_2 , sprawność elektrowni brutto i netto, strumień masy pary oraz jednostkowe zużycie paliwa obiegu elektrowni cieplnej pracującej według obiegu Rankine'a o parametrach: $p_1 = 20 \text{ MPa}$, $t_1 = 520^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,012 \text{ MPa}$.

Wartość opałowa paliwa umownego wynosi $W_u = 29,30 \text{ MJ / kg}$. W elektrowni zainstalowane są trzy turbogeneratory o mocy 360 MW każdy.

Założenia:

$$\eta_k = (0,70 - 0,90)$$

$$\eta_r = (0,98 - 0,99)$$

$$\eta_{mg} = (0,95 - 0,98)$$

$$\eta_w = 0,85$$

$$\varepsilon = 8\%$$

Wybrano:

$$\eta_k = 0,80$$

$$\eta_r = 0,98$$

$$\eta_{mg} = 0,95$$

Dane:

$$p_1 = 20 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 520^\circ \text{C}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



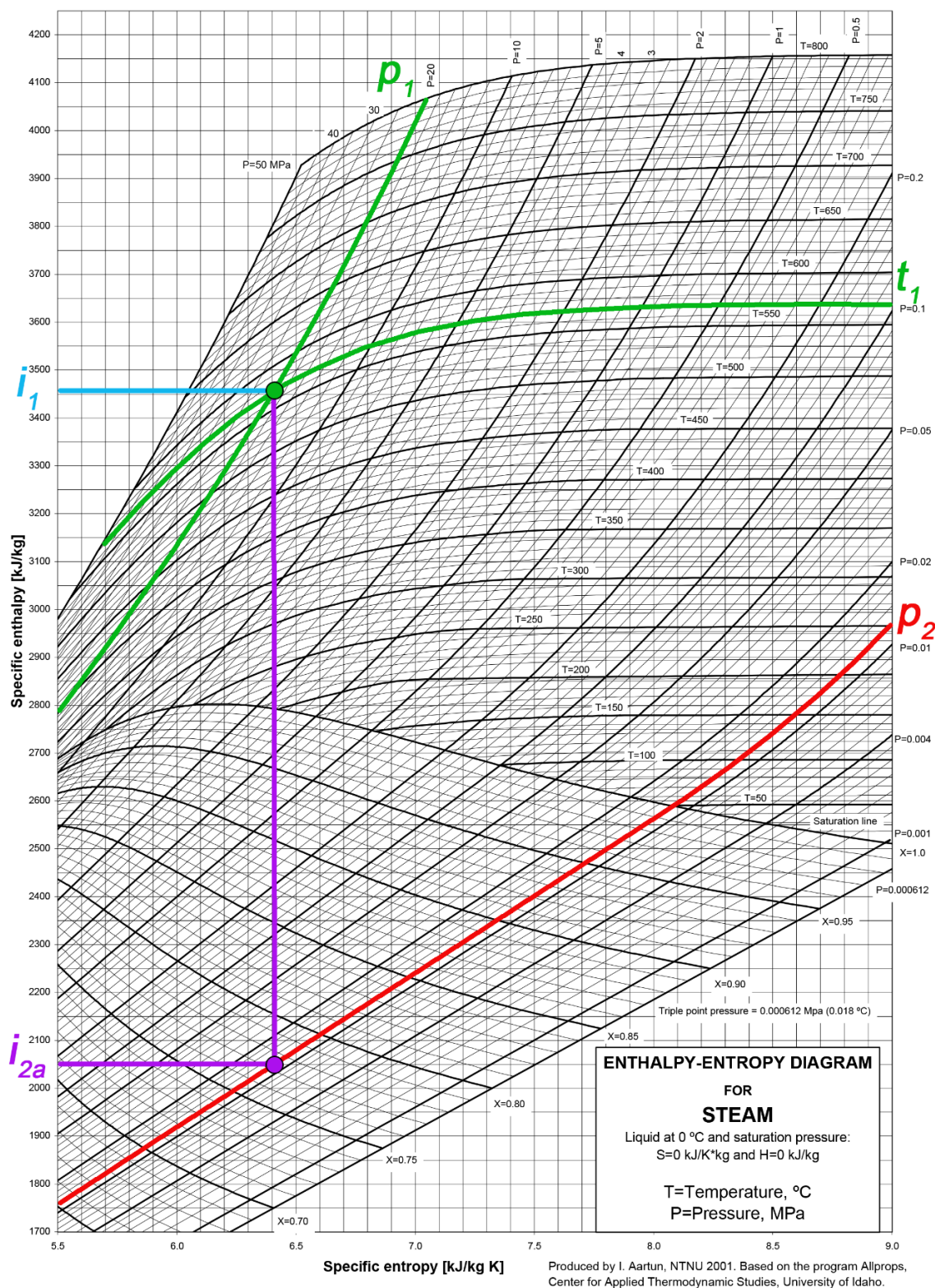
$$p_2 = 0,012 \text{ MPa}$$

Odczyt z wykresu:

$$i_1 = 3275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{2a} = 1960 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$





Rys. 2. Wykres entalpii-entropii dla pary wodnej.
[Opracowanie własne na podstawie 12]





Odczyt z tablicy wody i pary:

Entalpię i_{wz} należy odczytać z tablicy wody i pary dla wartości ciśnienia p_2 oraz dla $x = 0$.

$$i_{wz} = 206,94 \frac{kJ}{kg}$$

Tabela 1. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według ciśnienia [11]

Ciśnienie	Temperatura	Objętość właściwa ($x=0$)	Entalpia właściwa ($x=0$)	Ciepło parowania	Objętość właściwa ($x=1$)	Entalpia właściwa ($x=1$)
p	t	v'	i'	R	v''	i''
MPa	°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
0,0010	6,98	0,0010001	29,33	2484,5	129,208	2513,8
0,0015	13,02	0,0010006	54,71	2425,0	87,982	2525,0
0,002	17,50	0,0010012	73,45	2459,8	67,006	2533,0
0,003	24,09	0,0010027	101,00	2444,2	45,668	2545,1
0,004	28,97	0,0010040	121,41	2432,7	34,803	2554,2
0,005	32,89	0,0010052	137,77	2423,4	28,196	2561,2
0,006	36,17	0,0010064	151,5	2415,6	23,742	2567,1
0,008	41,52	0,0010084	173,87	2402,8	18,106	2576,7
0,010	45,82	0,0010102	191,84	2392,6	14,676	2584,4
0,012	49,44	0,0010119	206,94	2384,0	12,364	2590,9

Wzory:

Sprawność wewnętrzna turbiny:

$$\eta_w = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2a}} \quad (2)$$

Wzór na sprawność wewnętrzną turbiny należy przekształcić tak, aby otrzymać wzór na entalpię na wylocie z turbiny i_2 .

$$\eta_w = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2a}} \Rightarrow i_2 = i_1 - \eta_w \cdot (i_1 - i_{2a}) \quad (3)$$

$$i_2 = 3275 - 0,85 \cdot (3275 - 1960) = 2157 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (4)$$

Sprawność rzeczywista:

$$\eta_{rz} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{wz}} \quad (5)$$



$$\eta_{rz} = \frac{3275 - 2157}{3275 - 206,94} = 0,364 \quad (6)$$

Sprawność elektrowni brutto:

$$\eta_{eb} = \eta_k \cdot \eta_r \cdot \eta_{rz} \cdot \eta_{mg} \quad (7)$$

$$\eta_{eb} = 0,80 \cdot 0,98 \cdot 0,364 \cdot 0,95 = 0,271 \quad (8)$$

Sprawność elektrowni netto:

$$\eta_{en} = \eta_{eb} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (9)$$

$\varepsilon = 8\% = 0,08$ – do wzoru należy podstawić wartość dziesiętną.

$$\eta_{en} = 0,271 \cdot (1 - 0,08) = 0,249 \quad (10)$$

Strumień masy pary:

$$D_p = \frac{P_g}{(i_1 - i_2) \cdot \eta_{mg}} \quad (11)$$

Moc turbogeneratorsa P_g należy podstawić w jednostce miary kW .

$$D_p = \frac{360000}{(3275 - 2157) \cdot 0,95} = 338,95 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (12)$$

Jednostkowe zużycie paliwa:

$$b = \frac{1}{\eta_{eb} \cdot W_u} \cdot 3600 \quad (13)$$

W_u należy podstawić w jednostce miary $\frac{kJ}{kg}$.

$$b = \frac{1}{0,271 \cdot 29309} \cdot 3600 = 0,453 \left[\frac{kg}{kW \cdot h} \right] \quad (14)$$

$$\left[\frac{\frac{1}{kJ}}{\frac{kg}{kg}} = 1 \cdot \frac{kg}{kJ} = \frac{kg}{kW \cdot s} = \frac{kg}{kW \cdot \frac{1}{3600} \cdot h} = \frac{kg}{kW \cdot h} = kg \cdot \frac{3600}{kW \cdot h} = 3600 \cdot \frac{kg}{kW \cdot h} \right]$$

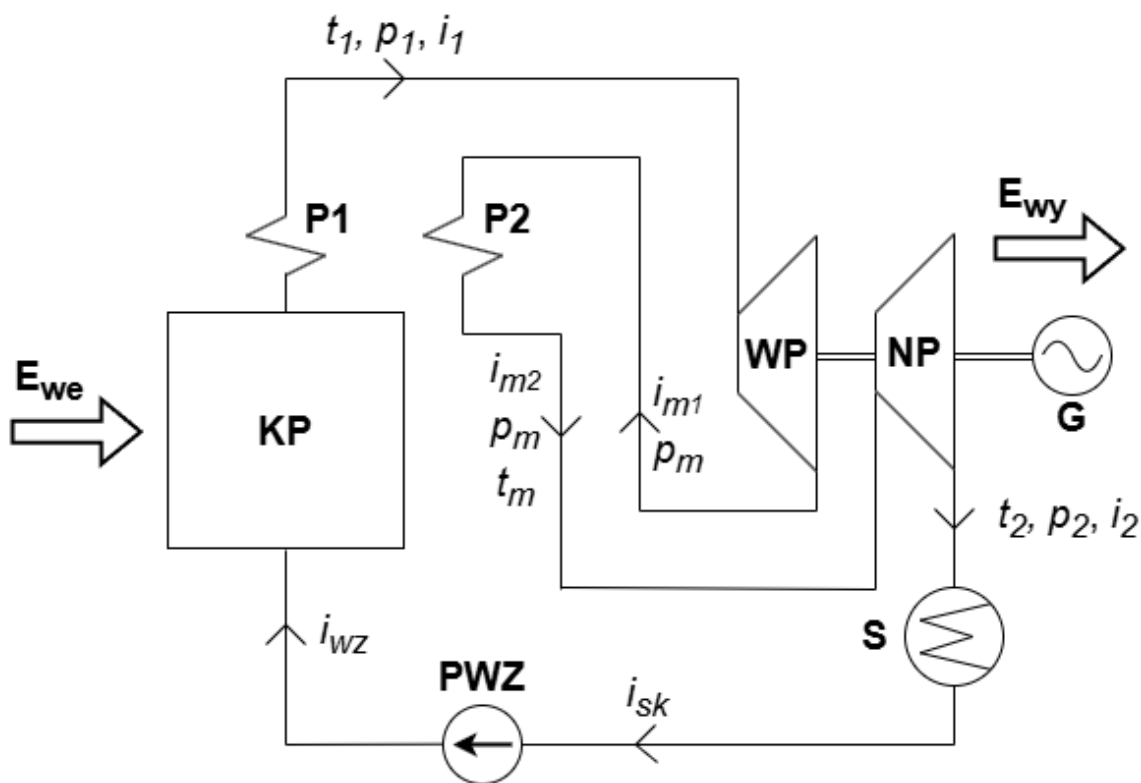


4.2. Obieg Rankine'a z międzystopniowym przegrzewaniem pary

Obieg z międzystopniowym przegrzewaniem pary – zaawansowana modyfikacja obiegu Rankine'a, w której para po rozprężeniu w turbinie wysokiego ciśnienia jest ponownie przegrzewana przed wprowadzeniem jej do turbiny niskiego ciśnienia. Ten obieg zwiększa sprawność układu i redukuje wilgotność pary, chroniąc turbinę przed erozją.

Międzystopniowe przegrzewanie pary stosuje się chcąc podnieść sprawność teoretyczną obiegu przez zwiększenie parametrów początkowych, nie przekraczając jednocześnie dopuszczalnej wilgotności pary w ostatnich stopniach turbiny. Obieg cieplny z międzystopniowym przegrzewaniem pary, oprócz zmniejszenia wilgotności końcowej, powoduje również zwiększenie sprawności teoretycznej. Międzystopniowe przegrzewanie pary przeprowadza się w dodatkowym przegrzewaczu umieszczonym w odpowiednim pod względem temperatury miejscu na drodze spalin w kotle – najczęściej na przewale kotła.

Realizacja obiegu z międzystopniowym przegrzewaniem pary wygląda następująco: para o parametrach p_1 , t_1 , i_1 jest rozprężona w części wysokoprężnej turbiny do ciśnienia międzystopniowego przegrzewu p_m , po czym odprowadzona jest do międzystopniowego przegrzewacza pary, umieszczonego w kotle. W przegrzewaczu tym następuje przegrzanie pary do temperatury t_m , której wielkość ustala się zwykle taką jak t_1 . Z przegrzewacza para wraca do części średnio- i niskoprężnej turbiny, gdzie jest rozprężona do ciśnienia końcowego p_2 .



Rys. 3. Obieg Rankine'a z międzystopniowym przegrzewaniem pary: KP – kocioł parowy, P1, P2 – przegrzewacze pary, WP – turbina parowa, część wysokoprężna, NP – turbina parowa, część niskoprężna, G – generator, S- skraplacz, PWZ – pompa wody zasilającej.

4.2.1. Przykładowe obliczenia

Obliczyć rzeczywiste entalpie wylotowe i_{m1} oraz i_2 , sprawność elektrowni brutto i netto, strumień masy pary oraz jednostkowe zużycie paliwa elektrowni pracującej według obiegu Rankine'a z międzystopniowym przegrzewaniem pary o parametrach: $p_1 = 14 \text{ MPa}$, $t_1 = t_m = 510^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,009 \text{ MPa}$, $p_m = 3 \text{ MPa}$. Wartość opałowa wynosi $W_u = 29,30 \text{ MJ / kg}$. W elektrowni zainstalowane są cztery turbogeneratory o mocy 200MW każdy.

Założenia:

$$\eta_k = (0,70 - 0,90)$$

$$\eta_r = (0,98 - 0,99)$$

Wybrano:

$$\eta_k = 0,80$$

$$\eta_r = 0,99$$



$$\eta_{mg} = (0,95 - 0,98)$$

$$\eta_{mg} = 0,95$$

$$\eta_{w1} = 0,85$$

$$\eta_{w2} = 0,87$$

$$\varepsilon = 8\%$$

Dane:

$$p_1 = 14 \text{ MPa}$$

$$t_1 = t_m = 510^\circ \text{C}$$

$$p_2 = 0,009 \text{ MPa}$$

$$p_m = 3 \text{ MPa}$$

Odczyt z wykresu:

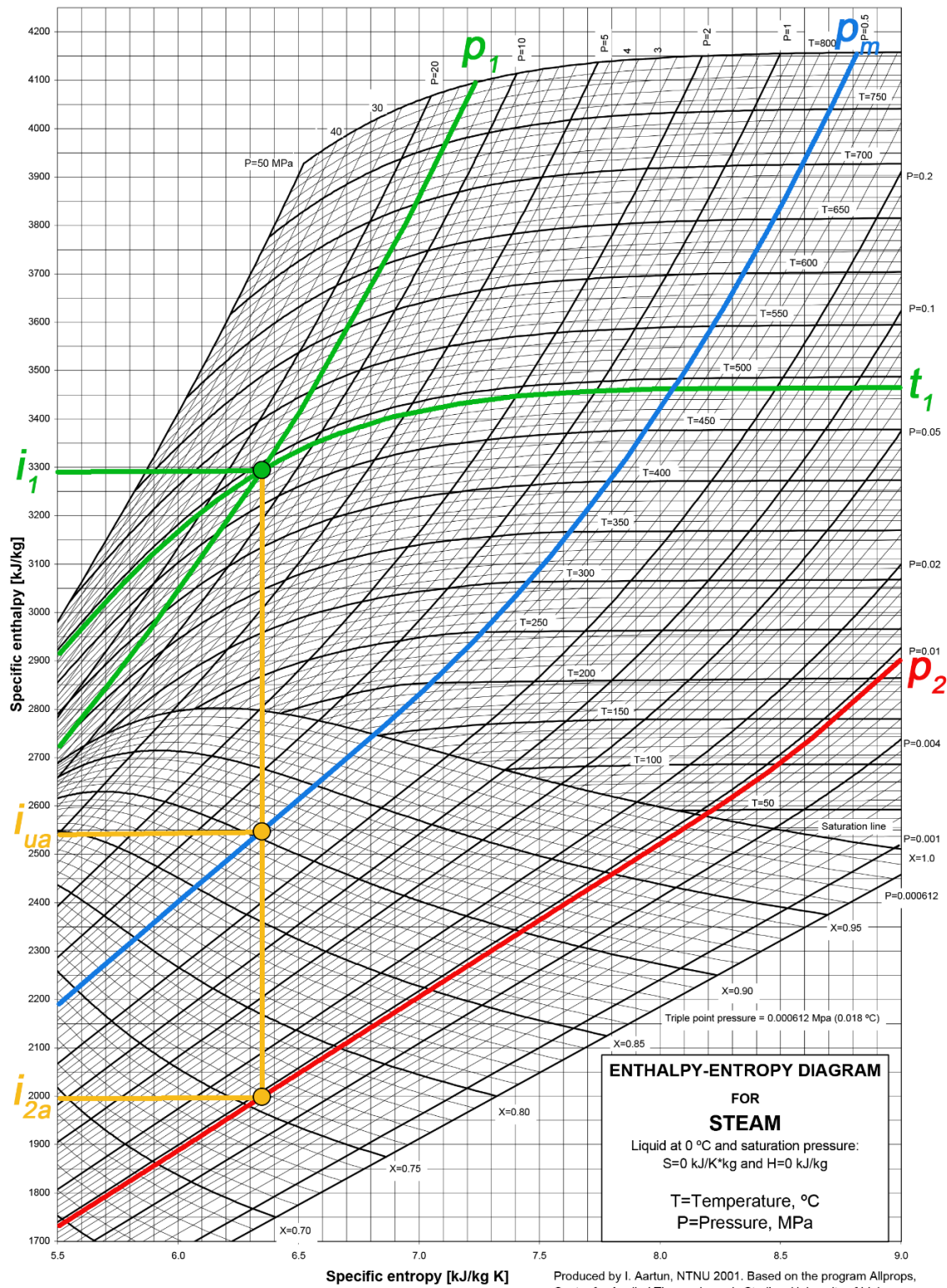
$$i_1 = 3352 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{m1a} = 2932 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{m2} = 3484 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{2a} = 2292 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{m2} > i_1 > i_{m1a} > i_{2a}$$



Rys. 4. Wykres entalpii-entropii dla pary wodnej.
[Opracowanie własne na podstawie 12]

Odczyt z tablicy wody i pary:

Jak odczytać entalpię z tablicy wody i pary dla wartości ciśnienia, która nie jest podana w tabeli?

$$p_2 = 0,009 \text{ MPa}$$

$$i_{wz} = \frac{173,87 + 191,84}{2} = 182,86 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \rightarrow \text{entalpię wody zasilającej } i_{wz} \text{ wyznacza się jako}$$

średnią z wartości entalpii dla ciśnienia niższego 0,008 MPa i wyższego 0,010 MPa.

Tabela 2. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według ciśnienia [11]

Ciśnienie	Temperatura	Objętość właściwa (x=0)	Entalpia właściwa (x=0)	Ciepło parowania	Objętość właściwa (x=1)	Entalpia właściwa (x=1)
p	t	v'	i'	R	v''	i''
MPa	°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
0,0010	6,98	0,0010001	29,33	2484,5	129,208	2513,8
0,0015	13,02	0,0010006	54,71	2425,0	87,982	2525,0
0,002	17,50	0,0010012	73,45	2459,8	67,006	2533,0
0,003	24,09	0,0010027	101,00	2444,2	45,668	2545,1
0,004	28,97	0,0010040	121,41	2432,7	34,803	2554,2
0,005	32,89	0,0010052	137,77	2423,4	28,196	2561,2
0,006	36,17	0,0010064	151,5	2415,6	23,742	2567,1
0,008	41,52	0,0010084	173,87	2402,8	18,106	2576,7
0,010	45,82	0,0010102	191,84	2392,6	14,676	2584,4
0,012	49,44	0,0010119	206,94	2384,0	12,364	2590,9

Wzory:

Sprawność wewnętrzna turbiny (część wysokoprężna):

$$\eta_{w1} = \frac{i_1 - i_{m1}}{i_1 - i_{m1a}} \quad (15)$$

Rzeczywistą entalpię wylotową i_{m1a} wyznacza się ze wzoru na sprawność wewnętrzną turbiny (część wysokoprężna):

$$\eta_{w1} = \frac{i_1 - i_{m1}}{i_1 - i_{m1a}} \Rightarrow i_{m1a} = i_1 - \eta_{w1} \cdot (i_1 - i_{m1a}) \quad (16)$$

$$i_{m1a} = 3352 - 0,85 \cdot (3352 - 2932) = 2995 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (17)$$

Sprawność wewnętrzna turbiny (część niskoprężna):

$$\eta_{w2} = \frac{i_{m2} - i_2}{i_{m2} - i_{2a}} \quad (18)$$



Rzeczywistą entalpię wylotową i_2 wyznacza się ze wzoru na sprawność wewnętrzną turbiny (część wysokoprężna):

$$\eta_{w2} = \frac{i_{m2} - i_2}{i_{m2} - i_{2a}} \Rightarrow i_2 = i_{m2} - \eta_{w2} \cdot (i_{m2} - i_{2a}) \quad (19)$$

$$i_2 = 3484 - 0,87 \cdot (3484 - 2292) = 2447 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (20)$$

Przyrost entalpii pary w przegrzewaczu międzystopniowym:

$$\Delta i_m = i_{m2} - i_{m1} \quad (21)$$

$$\Delta i_m = 3484 - 2995 = 489 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (22)$$

Sprawność rzeczywista:

$$\eta_{rz} = \frac{i_1 - i_2 + \Delta i_m}{i_1 - i_{wz} + \Delta i_m} \quad (23)$$

$$\eta_{rz} = \frac{3352 - 2447 + 489}{3352 - 182,86 + 489} = 0,381 \quad (24)$$

Sprawność elektrowni brutto:

$$\eta_{eb} = \eta_k \cdot \eta_r \cdot \eta_{rz} \cdot \eta_{mg} \quad (25)$$

$$\eta_{eb} = 0,80 \cdot 0,99 \cdot 0,381 \cdot 0,95 = 0,287 \quad (26)$$

Sprawność elektrowni netto:

$$\eta_{en} = \eta_{eb} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (27)$$

$$\eta_{en} = 0,287 \cdot (1 - 0,08) = 0,264 \quad (28)$$

Strumień masy pary:

$$D_p = \frac{P_g}{[(i_1 - i_{m1}) + (i_{m2} - i_2)] \cdot \eta_{mg}} \quad (29)$$

$$D_p = \frac{200000}{[(3352 - 2995) + (3484 - 2447)] \cdot 0,95} = 151,02 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (30)$$

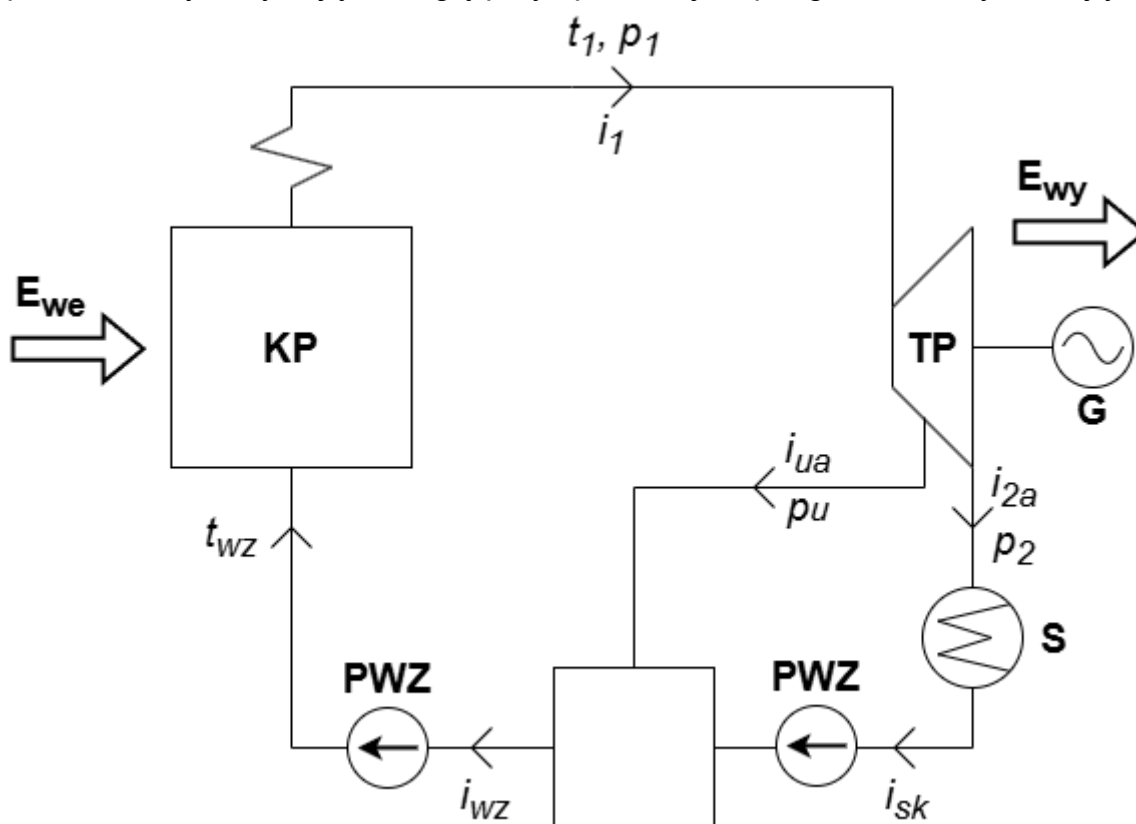
Jednostkowe zużycie paliwa:

$$b = \frac{1}{\eta_{eb} \cdot W_u} \cdot 3600 \quad (31)$$

$$b = \frac{1}{0,287 \cdot 29309} \cdot 3600 = 0,428 \left[\frac{kg}{kW \cdot h} \right] \quad (32)$$

4.3. Obieg z jednostopniowym przegrzewaniem pary i jednostopniowym regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej w podgrzewaczu mieszankowym

Obieg z jednostopniowym przegrzewaniem pary i jednostopniowym regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej w podgrzewaczu mieszankowym przy ciśnieniu pary upustowej – kolejna modyfikacja obiegu Rankine'a, która łączy przegrzewanie pary z odzyskiem ciepła z pary upustowej. Dzięki temu obieg ten osiąga wyższą sprawność, wykorzystując energię pary upustowej do podgrzania wody zasilającej.



Rys. 5. Blok z jednostopniowym przegrzewaniem pary oraz jednostopniowym regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej w podgrzewaczu mieszankowym przy ciśnieniu pary upustowej p_u .

Przyrost sprawności obiegu Rankine'a uzyskać można wykorzystując ciepło zawarte w parze, która częściowo rozprężyła się w turbinie, wykonując pracę do podgrzewania wody zasilającej. Ciepło to nie jest wtedy tracone w skraplaczu, lecz wraca do obiegu. Taki układ nazywa się układem z regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej.



Rysunek 3. przedstawia układ regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej, zawierającej jeden podgrzewacz mieszankowy. Para wodna przegrzana, o parametrach p_1, t_1 , którym odpowiada entalpia i_1 , jest doprowadzona do turbiny, gdzie rozpręża się politropowo. Część strumienia pary D dochodzącej do turbiny w ilości D_u , po rozprężeniu się do ciśnienia p_u , któremu odpowiada entalpia i_u , opuszcza turbinę i zasila mieszankowy podgrzewacz wody zasilającej. Pozostały strumień $D_k = D - D_u$ jest rozprężony do ciśnienia końcowego p_2 i skroplony w skraplaczu. Skropliny powstałe ze strumienia D_k o entalpii i_{sk} podawane są pompą skroplin do podgrzewacza mieszankowego. W podgrzewaczu następuje podgrzanie skroplin od strumienia pary upustowej D_u . Na wyjściu z podgrzewacza otrzymuje się parę o entalpii $i_{wz} > i_{sk}$.

4.3.1. Przykładowe obliczenia

Obliczyć rzeczywiste entalpie wylotowe i_u oraz i_2 , sprawność elektrowni brutto i netto, strumień masy pary oraz jednostkowe zużycie paliwa elektrowni pracującej według obiegu z jednostopniowym przegrzewaniem pary oraz jednostopniowym regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej w podgrzewaczu mieszankowym przy ciśnieniu pary upustowej p_u o parametrach: $p_1 = 14 \text{ MPa}$, $t_1 = 490^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,009 \text{ MPa}$, $p_u = 0,50 \text{ MPa}$. Wartość opałowa wynosi $W_u = 29,30 \text{ MJ / kg}$. W elektrowni zainstalowane są cztery turbogeneratory o mocy 200MW każdy i cztery turbogeneratory o mocy 100MW każdy.

Założenia:

$$\eta_k = (0,70 - 0,90)$$

$$\eta_r = (0,98 - 0,99)$$

$$\eta_{mg} = (0,95 - 0,98)$$

$$\eta_w = 0,85$$

$$\varepsilon = 8\%$$

Wybrano:

$$\eta_k = 0,80$$

$$\eta_r = 0,99$$

$$\eta_{mg} = 0,98$$

Dane:

$$p_1 = 14 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 490^\circ \text{C}$$

$$p_2 = 0,009 \text{ MPa}$$

$$p_u = 0,50 \text{ MPa}$$

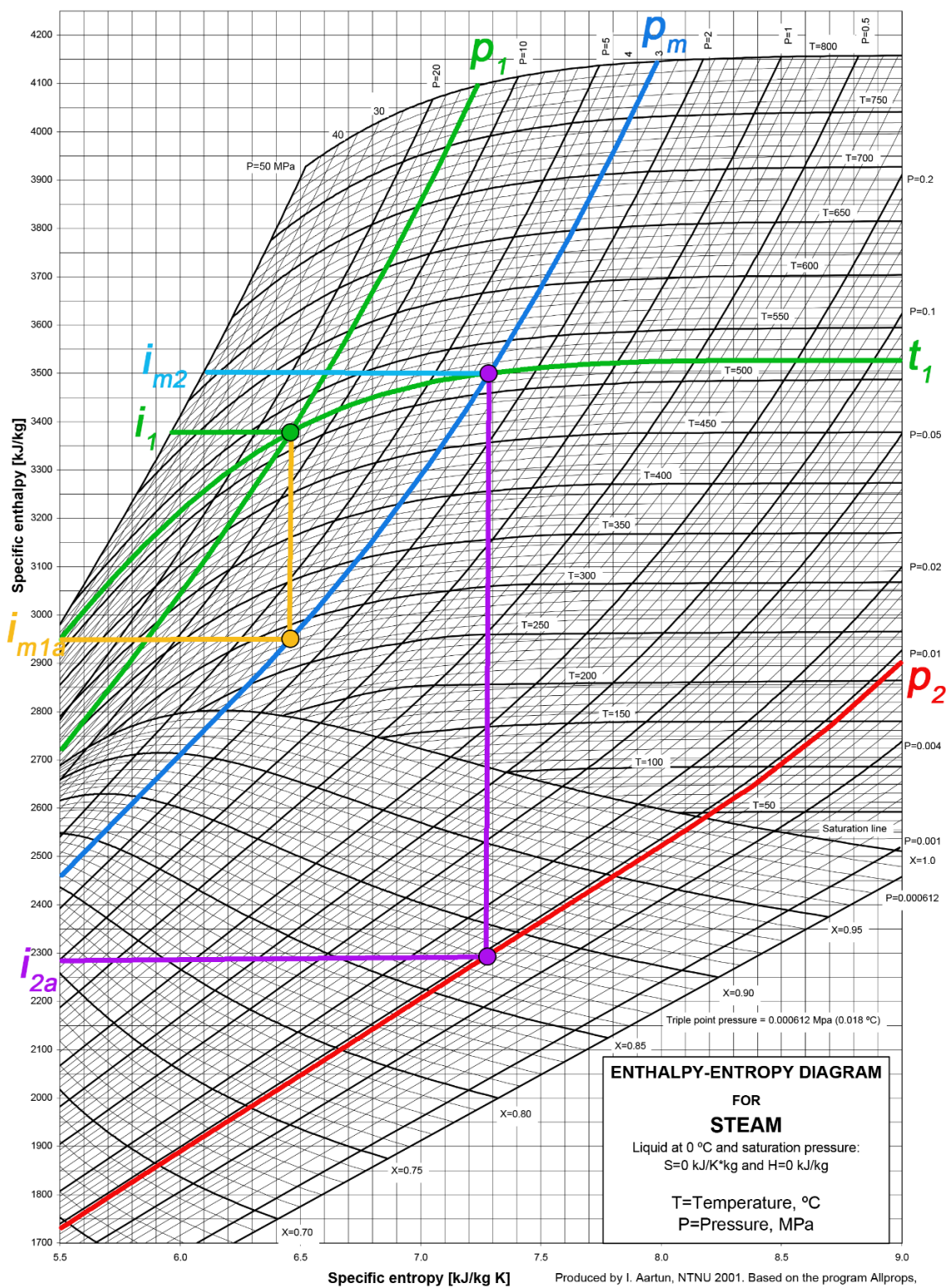


Odczyt z wykresu:

$$i_1 = 3260 \frac{kJ}{kg}$$

$$i_{2a} = 1940 \frac{kJ}{kg}$$

$$i_{ua} = 2520 \frac{kJ}{kg}$$



Rys. 6. Wykres entalpii-entropii dla pary wodnej.
[Opracowanie własne na podstawie 12]





Odczyt z tablicy wody i pary:

Entalpię wody zasilającej przyjmuje się jako entalpię skroplin przy ciśnieniu p_u .

$$i_{wz} = 640,1 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Entalpię skroplin odczytuje się jako entalpię wody przy ciśnieniu p_2 .

$$i_{sk} = \frac{173,87 + 191,84}{2} = 182,86 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Tabela 3. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według ciśnienia [11]

Ciśnienie	Temperatura	Objętość właściwa ($x=0$)	Entalpia właściwa ($x=0$)	Ciepło parowania	Objętość właściwa ($x=1$)	Entalpia właściwa ($x=1$)
p	t	v'	i'	R	v''	i''
MPa	°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
0,36	139,86	0,0010799	588,5	2145,3	0,51056	2733,8
0,38	141,78	0,0010819	596,8	2139,4	0,48527	2736,2
0,40	143,61	0,0010839	604,7	2133,8	0,46242	2738,5
0,45	147,91	0,0010885	623,2	2120,6	0,41392	2743,8
0,50	151,84	0,0010928	640,1	2108,4	0,37481	2748,5

Wzory:

Sprawność wewnętrzna turbiny:

$$\eta_w = \frac{i_1 - i_u}{i_1 - i_{ua}} \quad (33)$$

$$\eta_w = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2a}} \quad (34)$$

Rzeczywistą entalpię wylotową i_u wyznacza się ze wzoru na sprawność wewnętrzną turbiny:

$$\eta_w = \frac{i_1 - i_u}{i_1 - i_{ua}} \Rightarrow i_u = i_1 - \eta_w \cdot (i_1 - i_{ua}) \quad (35)$$

$$i_u = 3260 - 0,85 \cdot (3260 - 2520) = 2631 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (36)$$

Rzeczywistą entalpię wylotową i_2 wyznacza się ze wzoru na sprawność wewnętrzną turbiny:



$$\eta_w = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2a}} \Rightarrow i_2 = i_1 - \eta_w \cdot (i_1 - i_{2a}) \quad (37)$$

$$i_2 = 3260 - 0,85 \cdot (3260 - 1940) = 2138 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (38)$$

Współczynnik upustu:

$$u = \frac{i_{wz} - i_{sk}}{i_u - i_{sk}} \quad (39)$$

$$u = \frac{640,1 - 182,86}{2631 - 182,86} = 0,187 \quad (40)$$

Sprawność rzeczywista:

$$\eta_{rz} = 1 - \frac{(1-u) \cdot (i_2 - i_{sk})}{(i_1 - i_{wz})} \quad (41)$$

$$\eta_{rz} = 1 - \frac{(1-0,187) \cdot (2138 - 182,86)}{(3260 - 640,1)} = 0,393 \quad (42)$$

Sprawność elektrowni brutto:

$$\eta_{eb} = \eta_k \cdot \eta_r \cdot \eta_{rz} \cdot \eta_{mg} \quad (43)$$

$$\eta_{eb} = 0,80 \cdot 0,99 \cdot 0,393 \cdot 0,98 = 0,305 \quad (44)$$

Sprawność elektrowni netto:

$$\eta_{en} = \eta_{eb} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (45)$$

$$\eta_{en} = 0,305 \cdot (1 - 0,08) = 0,281 \quad (46)$$

Strumień masy pary:

Strumień masy pary oblicza się dla każdego typu turbogeneratorów.

$$D_p = \frac{P_g}{[(i_1 - i_u) + (1-u) \cdot (i_1 - i_2)] \cdot \eta_{mg}} \quad (47)$$

$$D_p = \frac{100000}{[(3260 - 2631) + (1-0,187) \cdot (3260 - 2138)] \cdot 0,98} = 66,21 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (48)$$

$$D_p = \frac{200000}{[(3260 - 2631) + (1-0,187) \cdot (3260 - 2138)] \cdot 0,98} = 131,42 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (49)$$

Jednostkowe zużycie paliwa:

$$b = \frac{1}{\eta_{eb} \cdot W_u} \cdot 3600 \quad (50)$$

$$b = \frac{1}{0,305 \cdot 29309} \cdot 3600 = 0,403 \left[\frac{kg}{kW \cdot h} \right] \quad (51)$$



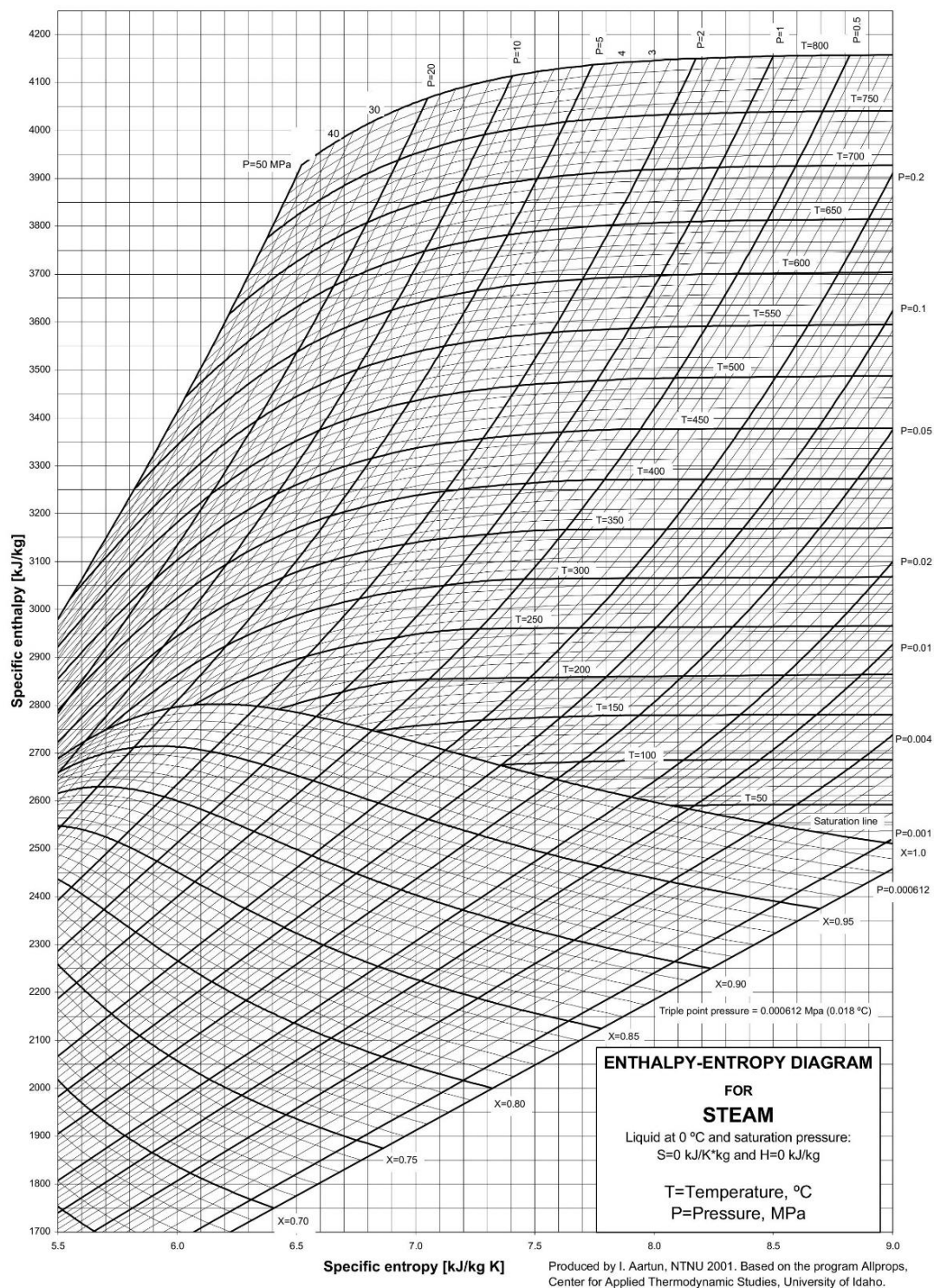
5. Literatura

1. Bełdowski T., Markiewicz H. (2018). *Stacje i urządzenia elektroenergetyczne*, WNT.
2. Buchta J., Oziemski A. (2009). *Procesy energetyczne w wytwarzaniu energii elektrycznej w zadaniach*, Politechnika Łódzka.
3. Kacejko P. (2014). *Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
4. Kujszczyk S. (2014). *Elektroenergetyczne Sieci rozdzielcze tom I i II*, Wydanie III, OWPW, Warszawa.
5. Lewandowski W. (2020). *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, PWN.
6. Marecki J. (2020), *Podstawy przemian energetycznych*, Wydanie VII, WNT, Warszawa.
7. Pawlik M., Strzelczyk F. (2017). *Elektrownie*, Wydanie VIII, WNT, Warszawa.
8. Stępień J. C. (1977). *Materiały pomocnicze do projektowania elektrociepłowni przemysłowych*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
9. Wasiak I., Pawełek R. (2019). *Jakość zasilania w sieciach z generacją rozproszoną*, PWN.
10. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki (2006). Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Zakład Procesów Ciepłych, Miernictwa i Ochrony Powietrza, *Wybrane tablice cieplne. Materiały pomocnicze do ćwiczeń z Termodynamiki i Wymiany Ciepła*, Kraków.
11. https://home.agh.edu.pl/~siwek/Maszyny_I_Urządzenia_Energetyczne_2017/Z.4.%20Energetyka%20parowa/Wykres%20i%20tablice.pdf
12. <https://www.scribd.com/document/441754344/Enthalpy-Entropy-Diagram-for-Steam-med-50-MPa>





6. Załączniki



Rys.7. Wykres entalpia – entropia (wykres Molliera) [12].

Tabela 4. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według temperatur [11]

Temperatura	Ciśnienie	Objętość właściwa ($x=0$)	Entalpia właściwa ($x=0$)	Ciepło parowania	Objętość właściwa ($x=1$)	Entalpia właściwa ($x=1$)
t	p	v'	i'	r	v''	i''
°C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
0	0,00061	0,0010002	0,0	2500,6	206,29	2500,6
5	0,00087	0,0010001	21,05	2488,9	147,15	2509,9
10	0,00123	0,0010004	42,04	2477,2	106,42	2519,2
15	0,00170	0,0010010	62,97	2465,4	77,97	2528,4
20	0,00234	0,0010018	83,90	2453,6	57,84	2537,5
25	0,00317	0,0010030	104,80	2441,8	41,40	2546,6
30	0,00424	0,0010044	125,69	2430,0	32,93	2555,7
35	0,00562	0,0010061	146,59	2418,1	25,24	2564,7
40	0,00737	0,0010079	167,51	2406,2	19,55	2573,7
45	0,00958	0,0010099	188,41	2394,2	15,28	2582,6
50	0,01233	0,0010121	209,30	2382,1	12,04	2591,4
55	0,01574	0,0010145	230,19	2370,0	9,578	2600,2
60	0,01992	0,0010171	251,13	2357,9	7,678	2609,0
65	0,02501	0,0010199	272,06	2345,6	6,201	2617,7
70	0,03117	0,0010228	293,00	2333,2	5,045	2626,2
75	0,03855	0,0010258	313,97	2320,8	4,133	2634,8
80	0,04736	0,0010290	334,95	2308,2	3,408	2643,2
85	0,05780	0,0010324	355,95	2295,5	2,828	2651,5
90	0,07011	0,0010359	376,97	2282,7	2,360	2659,7
95	0,08452	0,0010396	398,04	2269,8	1,982	2667,8
100	0,10132	0,0010435	419,10	2256,7	1,673	2675,8
105	0,12080	0,0010474	440,21	2243,4	1,419	2683,6
110	0,14327	0,0010515	461,35	2230,0	1,210	2691,3
115	0,16906	0,0010558	482,52	2216,3	1,036	2698,9
120	0,19854	0,0010603	503,70	2202,5	0,892	2706,3
125	0,23208	0,0010649	525,00	2188,4	0,770	2713,5
130	0,27011	0,0010697	546,40	2174,1	0,668	2720,5
135	0,31300	0,0010747	567,70	2159,6	0,582	2727,3
140	0,36140	0,0010798	589,1	2144,8	0,509	2733,9
145	0,41550	0,0010851	610,7	2129,7	0,446	2740,4
150	0,4760	0,0010906	632,2	2114,3	0,393	2746,5
155	0,5433	0,0010962	654,0	2098,6	0,347	2752,5
160	0,6180	0,0011021	675,3	2082,6	0,307	2758,1
165	0,7008	0,0011081	697,3	2066,3	0,272	2763,5
170	0,7920	0,0011144	719,3	2049,5	0,243	2768,7
175	0,8925	0,0011208	741,3	2032,4	0,217	2773,5
180	1,0027	0,0011275	763,3	2014,9	0,194	2778,0
185	1,1235	0,0011344	785,2	1997,0	0,174	2782,3
190	1,2553	0,0011415	807,4	1978,6	0,156	2786,1
195	1,3989	0,0011489	829,8	1959,8	0,141	2789,7
200	1,5550	0,0011565	852,4	1940,4	0,127	2792,8
205	1,7245	0,0011644	875,1	1920,5	0,115	2795,6
210	1,9080	0,0011726	897,7	1900,2	0,104	2797,9
215	2,1062	0,0011812	920,7	1987,2	0,095	2799,9
220	2,3202	0,0011900	943,7	1897,7	0,089	2801,4

Tabela 5. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według temperatur [11] (cd.)

Temperatura	Ciśnienie	Objętość właściwa ($x=0$)	Entalpia właściwa ($x=0$)	Ciepło parowania	Objętość właściwa ($x=1$)	Entalpia właściwa ($x=1$)
t	p	v'	i'	r	v''	i''
°C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
225	2,5504	0,0011992	966,8	1835,6	0,078	2802,5
230	2,7979	0,0012087	990,4	1812,9	0,071	2803,2
235	3,0635	0,0012187	1014,1	1789,5	0,065	2823,4
240	3,3480	0,0012291	1037,5	1765,4	0,060	2803,1
245	3,6524	0,0012399	1061,4	1740,6	0,055	2802,3
250	3,9776	0,0012512	1085,7	1715,1	0,050	2800,9
255	4,325	0,0012631	1110,4	1688,7	0,046	2799,0
260	4,694	0,0012755	1135,1	1661,4	0,042	2796,4
265	5,087	0,0012886	1160,2	1633,3	0,039	2793,3
270	5,505	0,0013023	1185,3	1604,2	0,036	2789,4
275	5,949	0,0013168	1210,8	1574,0	0,033	2784,9
280	6,419	0,0013321	1236,8	1542,7	0,030	2779,6
285	6,918	0,0013483	1263,0	1510,2	0,028	2773,4
290	7,445	0,0013655	1290,0	1476,4	0,026	2766,3
295	8,002	0,0013839	1317,2	1441,1	0,024	2758,3
300	8,592	0,001404	1345,0	1404,3	0,022	2749,2
305	9,214	0,001425	1373,3	1365,7	0,020	2738,9
310	9,870	0,001447	1402,2	1325,1	0,018	2727,3
315	10,561	0,001472	1431,9	1282,4	0,017	2714,1
320	11,289	0,001499	1462,0	1237,4	0,015	2699,6
325	12,057	0,001529	1493,6	1189,9	0,014	2683,5
330	12,864	0,001562	1526,1	1139,5	0,013	2565,5
335	13,715	0,001599	1559,8	1085,4	0,012	2545,2
340	14,608	0,001639	1594,8	1027,2	0,011	2622,0
345	15,547	0,001686	1631,8	963,5	0,010	2595,4
350	16,537	0,001741	1671,6	893,0	0,009	2564,2
355	17,577	0,001807	1713,9	813,1	0,008	2527,0
360	18,674	0,001894	1761,9	719,5	0,007	2481,1
365	19,840	0,002020	1817,8	603,3	0,006	2410,9
370	21,053	0,002220	1892,5	438,3	0,005	2330,7
374,15	22,129	0,031470	2095,2	0	0,003	2095,2

Tabela 6. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według ciśnienia [11]

Ciśnienie	Temperatura	Objętość właściwa ($x=0$)	Entalpia właściwa ($x=0$)	Ciepło parowania	Objętość właściwa ($x=1$)	Entalpia właściwa ($x=1$)
p	t	v'	i'	R	v''	i''
MPa	°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
0,0010	6,98	0,0010001	29,33	2484,5	129,208	2513,8
0,0015	13,02	0,0010006	54,71	2425,0	87,982	2525,0
0,002	17,50	0,0010012	73,45	2459,8	67,006	2533,0
0,003	24,09	0,0010027	101,00	2444,2	45,668	2545,1
0,004	28,97	0,0010040	121,41	2432,7	34,803	2554,2
0,005	32,89	0,0010052	137,77	2423,4	28,196	2561,2
0,006	36,17	0,0010064	151,5	2415,6	23,742	2567,1
0,008	41,52	0,0010084	173,87	2402,8	18,106	2576,7
0,010	45,82	0,0010102	191,84	2392,6	14,676	2584,4
0,012	49,44	0,0010119	206,94	2384,0	12,364	2590,9
0,015	54,34	0,0010140	225,98	2372,9	10,025	2598,9
0,020	60,08	0,0010172	251,46	2358,1	7,6515	2609,6
0,025	64,98	0,0010199	271,99	2346,1	6,2060	2628,1
0,030	69,11	0,0010223	289,31	2336,0	5,2308	2625,3
0,040	75,88	0,0010265	317,65	2319,2	3,9949	2636,8
0,05	81,34	0,0010301	340,57	2305,4	3,2415	2646,0
0,06	85,94	0,0010333	359,93	2293,7	2,7329	2653,6
0,07	89,95	0,0010361	376,77	2283,4	2,3658	2660,2
0,08	93,50	0,0010387	391,72	2274,3	2,0879	2666,0
0,09	96,70	0,0010412	405,21	2265,9	1,8701	2671,1
0,10	99,62	0,0010434	417,51	2258,2	1,6946	2675,7
0,11	102,31	0,0010455	428,84	2251,2	1,5501	2680,0
0,12	104,80	0,0010476	439,36	2244,4	1,4289	2683,8
0,13	107,12	0,0010495	449,19	2238,2	1,3258	2687,4
0,15	111,36	0,0010530	467,13	2226,8	1,1597	2693,9
0,16	113,31	0,0010547	475,38	2221,4	1,0917	2696,8
0,18	116,92	0,0010579	490,70	2211,4	0,97775	2702,1
0,20	120,22	0,0010608	504,70	2202,2	0,88592	2706,9
0,22	123,26	0,0010636	517,60	2193,7	0,81027	2711,3
0,24	126,08	0,0010663	529,6	2185,7	0,74684	2715,3
0,26	128,72	0,0010688	540,9	2178,1	0,69288	2719,0
0,28	131,19	0,0010712	551,4	2170,9	0,64636	2722,3
0,30	133,53	0,0010735	561,4	2164,1	0,60586	2725,5
0,32	135,75	0,0010757	570,9	2157,5	0,57027	2728,4
0,34	137,85	0,0010779	579,9	2151,3	0,53871	2731,2
0,36	139,86	0,0010799	588,5	2145,3	0,51056	2733,8
0,38	141,78	0,0010819	596,8	2139,4	0,48527	2736,2
0,40	143,61	0,0010839	604,7	2133,8	0,46242	2738,5
0,45	147,91	0,0010885	623,2	2120,6	0,41392	2743,8
0,50	151,84	0,0010928	640,1	2108,4	0,37481	2748,5
0,60	158,83	0,0011009	670,4	2086,0	0,31556	2756,4
0,70	164,95	0,0011082	697,1	2065,8	0,27274	2762,9
0,80	170,41	0,0011150	720,9	2047,5	0,24030	2768,4
0,90	175,35	0,0011213	742,6	2030,4	0,21484	2773,0
1,0	179,87	0,0011274	762,6	2014,4	0,19430	2777,0

Tabela 7. Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$ i $x = 1$, uszeregowane według ciśnienia [11] (cd.)

Ciśnienie	Temperatura	Objętość właściwa ($x=0$)	Entalpia właściwa ($x=0$)	Ciepło parowania	Objętość właściwa ($x=1$)	Entalpia właściwa ($x=1$)
p	t	v'	i'	R	v''	i''
MPa	°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	m ³ /kg	kJ/kg
1,1	184,05	0,0011331	781,1	1999,3	0,17739	2780,4
1,2	187,95	0,0011386	798,4	1985,0	0,16320	2783,4
1,3	191,59	0,0011438	814,7	1971,3	0,15112	2786,0
1,4	195,03	0,0011489	830,1	1958,3	0,14072	2788,4
1,5	198,27	0,0011538	844,7	1945,7	0,13165	2790,4
1,6	201,36	0,0011586	858,6	1933,6	0,12368	2792,2
1,7	204,29	0,0011633	871,8	1922,0	0,11661	2773,8
1,8	207,09	0,0011678	884,6	2795,1	0,11031	2795,1
1,9	209,78	0,0011722	896,8	1899,6	0,10464	2796,4
2,0	212,36	0,0011766	908,6	1888,8	0,09953	2797,4
2,2	217,23	0,0011500	930,9	1868,2	0,09064	2799,1
2,4	221,77	0,0011932	951,9	1848,5	0,08319	2800,4
2,6	226,02	0,0012011	971,7	1829,5	0,07138	2801,2
2,8	230,03	0,0012088	990,5	1811,2	0,07138	2801,7
3,0	233,83	0,0012163	1008,4	1793,5	0,06662	2801,9
3,2	237,43	0,0012237	1025,5	1776,3	0,06243	2801,8
3,4	240,87	0,0012310	1041,8	1759,7	0,05872	2801,5
3,6	244,15	0,0012381	1057,6	1743,4	0,05540	2801,0
3,8	247,30	0,0012451	1072,8	1727,5	0,05243	2800,3
4,0	250,32	0,0012521	1087,5	1711,9	0,04974	2799,4
4,2	253,23	0,0012580	1101,7	1696,7	0,04729	2798,4
4,4	256,04	0,0012657	1115,5	1681,7	0,04506	2797,2
4,6	258,75	0,0012725	1128,9	1667,0	0,04302	2795,9
4,8	261,37	0,0012792	1141,9	1652,5	0,04114	2794,4
5,0	263,91	0,0012858	1154,6	1638,2	0,03941	2792,8
6,0	275,55	0,0013187	1213,9	1569,4	0,03241	2783,3
7,0	285,79	0,0013514	1267,7	1503,7	0,02734	2771,4
8,0	294,97	0,0013843	1317,5	1440,0	0,02349	2757,5
9,0	303,30	0,0014179	1364,2	1377,6	0,02046	2741,8
10,0	310,95	0,0014526	1408,6	1315,8	0,01800	2724,4
11,0	318,03	0,0014887	1451,2	1254,2	0,01597	2705,4
12,0	324,63	0,0015267	1492,6	1192,2	0,01425	2684,8
13,0	330,80	0,0015670	1533,0	1129,4	0,01277	2662,4
14,0	336,62	0,0016104	1572,8	1065,5	0,01149	2638,3
15,0	342,11	0,0016580	1612,2	999,4	0,010350	2611,6
16,0	347,31	0,0017101	1651,5	931,2	0,009330	2582,7
17,0	352,25	0,0017690	1691,6	859,2	0,008401	2550,8
18,0	356,95	0,0018380	1733,4	781,4	0,007534	2514,4
19,0	361,43	0,0019231	1778,2	691,9	0,006700	2470,1
20,0	365,70	0,0020380	1828,8	585,0	0,005873	2413,8
21,0	369,78	0,0022180	1892,2	448,0	0,005006	2340,2
22,0	373,67	0,0026750	2007,7	184,8	0,003757	2192,5
22,115	374,11	0,0031470	2095,2	0	0,003147	2095,2