

BAB II

DASAR TEORI

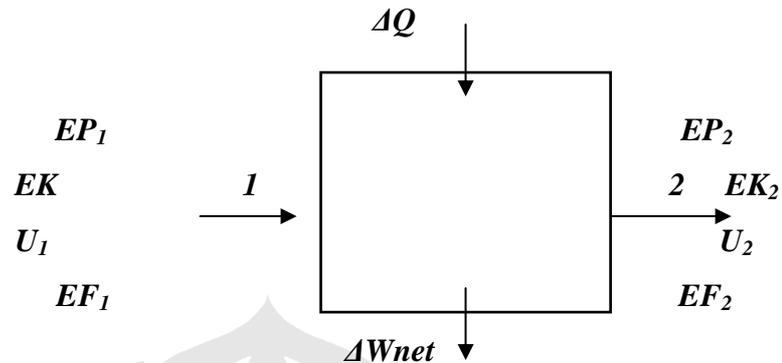
2.1 HUKUM TERMODINAMIKA DAN SISTEM TERBUKA

Hukum pertama termodinamika adalah hukum kekekalan energi. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dilenyapkan. Energi dari suatu sistem yang mengalami perubahan (proses) dapat bertambah atau berkurang oleh pertukaran lingkungan dan dapat diubah dari bentuk yang satu ke bentuk lain dalam suatu sistem. Jadi hukum ini menyatakan tentang pertukaran dan kemampuan perubahan energi, menjaga bahwa dalam setiap perubahan semua energi harus diperhitungkan. Hukum pertama tidak menunjukkan apakah perubahan energi berlangsung secara sempurna atau tidak, atau apakah beberapa bentuk energi dapat dikonversikan secara penuh ke bentuk lain. Masalah keterbatasan tersebut dilanjutkan dalam hukum termodinamika kedua.

Sebenarnya, pernyataan matematis yang paling umum mengenai hukum pertama termodinamika adalah untuk sistem terbuka yang mengalami perubahan transien. Sistem terbagi menjadi dua yaitu, sistem terbuka dan sistem tertutup. Yang dimaksud sistem adalah setiap bagian tertentu, yang volume dan batas-batasnya tidak perlu tetap, dimana perpindahan dan konservasi energi serta massanya akan dikaji. Sistem terbuka terjadi bila energi dan massa dapat melintasi sistem. Sistem terbuka dalam keadaan transien adalah sistem dimana aliran massa yang masuk dan keluar tidak sama atau berubah dengan waktu. Sistem terbuka dengan keadaan tunak (*steady*) atau sistem aliran-tunak keadaan-tunak, karena aliran massa dan energi melalui bidang batas tidak berubah menurut waktu dan jumlah massanya juga tetap. Sistem aliran terbuka berlaku untuk energi mekanik (artinya, mengabaikan energi listrik, kimia dan efek-efek lain) digambarkan dalam bentuk bagan pada gambar 1.1. Persamaan hukum pertama termodinamika untuk sistem itu adalah :

Energy balance $_1 = \text{Energy balance } _2$

$$EP_1 + EK_1 + U_1 + EF_1 + \Delta Q = EP_2 + EK_2 + U_2 + EF_2 + \Delta W_{net} \quad (2.1)$$



Gambar 2.1 Bagan sistem aliran tunak dengan satu aliran masuk dan keluar

- EP = energi potensial

$$EP = \frac{mgh}{g_c} \quad (2.2)$$

Dengan m adalah massa sejumlah zat yang masuk dan keluar dari sistem, z adalah ketinggian sisi 1 dan 2 diatas titik datum, g adalah percepatan gravitasi, dan g_c adalah faktor konversi yang bilangannya adalah $32,2 \text{ lb}_m \text{ ft}/\text{lb}_f \text{ s}^2$ atau $1 \text{ Kgm}/\text{Ns}^2$.

- EK = energi kinetik

$$EK = \frac{1}{2} mV_s^2 \quad (2.3)$$

dimana V_s adalah kecepatan pada 1 dan 2

- U = energi dalam (*internal energy*)

Adalah semata-mata fungsi suhu dari gas ideal, sedangkan untuk gas, uap dan cairan yang non-ideal terutama merupakan fungsi suhu, disamping juga merupakan sedikit fungsi tekanan. Energi dalam merupakan ukuran aktivitas dalam (molekul) dan interaksi fluida.

- EF = energi fluida

$$EF = PV \quad (2.4)$$

P = tekanan fluida dan V = volume fluida

Energi aliran adalah kerja yang dilakukan oleh fluida yang mengalir untuk mendorong sejumlah massa m ke dalam atau ke luar sistem.

- ΔQ = kalor netto

$$\Delta Q = Q_a - Q_r \quad (2.5)$$

atau

$$\Delta Q = mc_n(T_2 - T_1) \quad (2.6)$$

dimana Q_a = kalor yang ditambahkan dan Q_r = kalor yang dilepas dari sistem melalui bidang batas, sedangkan c_n = kalor spesifik yang bergantung pada proses yang berlangsung antara 1 dan 2 yang nilainya diberikan pada table 2.1.

Tabel 2.1 Kalor Spesifik Untuk Berbagai Proses

proses	C_n	n
Tekanan tetap	C_p	0
Temperatur tetap	∞	1
Adiabatik mampu balik	0	$K = C_p/C_v$
Volume tetap	C_v	∞
politropik	$C_v = k-n/1-n$	0 - ∞

- ΔW = kerja mekanik aliran tunak yang dilakukan oleh sistem

$$\Delta W = W_{by} - |W_{on}| \quad (2.7)$$

Dimana W_{by} adalah kerja yang dilakukan oleh sistem dan W_{on} adalah kerja yang dilakukan terhadap sistem.

- Entalpi

$$H = U + PV$$

atau

$$h = u + Pv \quad (2.8)$$

Merupakan nilai yang sering muncul secara bersama-sama, karena itu gabungan nilai ini diberi nama entalpi dengan lambing H atau h

Entalpi dan energi dalam merupakan sifat properties fluida, yang berarti masing-masing mempunyai nilai tunggal untuk setiap keadaan tertentu, definisinya adalah

$$C_v \equiv (\delta U / \delta T)_n \quad (2.9)$$

$$C_p \equiv (\delta h / \delta T)_p \quad (2.10)$$

$$C_p - C_v = R \quad (2.11)$$

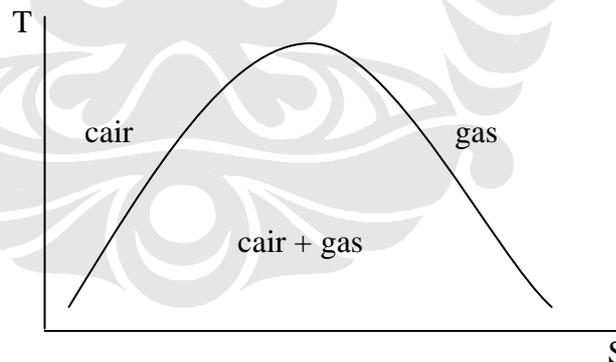
dimana R adalah konstanta gas, untuk gas ideal

$$du = C_v dT \quad (2.12)$$

$$dh = C_p dT \quad (2.13)$$

2.2 SIFAT-SIFAT FLUIDA AIR

Nilai sifat-sifat air (*vapour dan steam*) lebih kompleks dari gas ideal. Keterangan mengenai sifat-sifat air dapat diperjelas berdasarkan gambar 1.2.

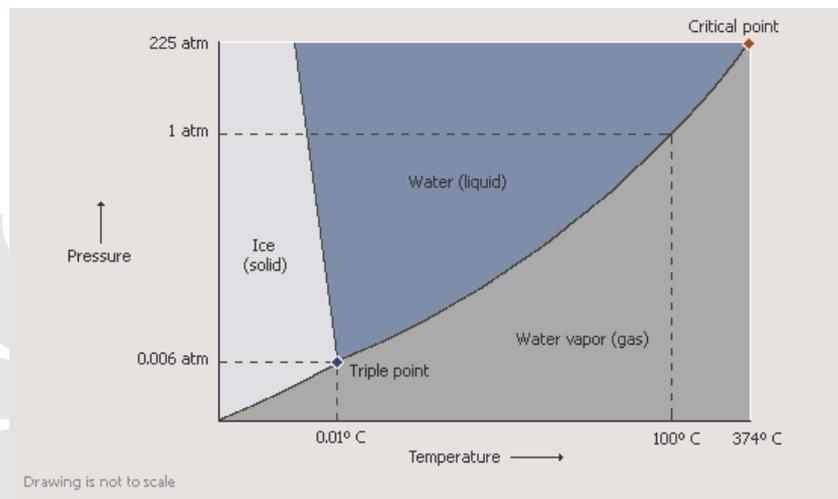


Gambar 2.2 T-S diagram fluida air

dimana daerah disebelah kiri kubah merupakan daerah fase cair dan garis kubah-nya merupakan fasa jenuh cair. Sedangkan daerah di sebelah kanan kubah merupakan daerah fase gas dan garis kubah-nya merupakan fase jenuh gas.

Titik Triple Air

Triple point adalah hubungan antara temperatur dan tekanan dalam campuran tiga fase suatu zat, yaitu padat, cair dan gas pada titik keseimbangannya. *Tripel point* air biasanya digunakan untuk mendefinisikan suatu satuan temperatur yang digunakan sebagai satuan internasional. Pada titik ini, dapat memungkinkan suatu zat berubah dalam bentuk tiga fase padat, cair dan gas apabila berada pada temperatur 273.16 K (0.01 °C) dan tekanan 611.73 pascal (0.00604 atm).



Gambar 2.3 Fase diagram air

2.3 PROSES THROTLING

Salah satu teknologi yang digunakan dalam pemanfaatan air buangan kondensor adalah dengan melakukan *throttling*/pencekikan. *Throttling* adalah proses ekspansi tak-terkendai suatu fluida dari daerah tekanan tinggi (dan dapat juga bersuhu tinggi) ke daerah bertekanan rendah. Dalam proses ini tidak ada kerja yang dilakukan, perpindahan kalor melalui lubang katup *throttling* itu sangat kecil (dapat diabaikan). Energi kinetik tinggi yang dihasilkan dilesap dalam gesekan fluida untuk mengembalikan entalpi fluida ke nilai semula. Memang dalam proses ini entalpi konstan, tetapi secara analisa, sebenarnya terjadi perubahan energi dalam (Δu) dan energi alirannya ($P v$) karena terjadi perubahan tekanan dan temperatur^[3].

$$E_1 = E_2 \quad (2.14)$$

$$EP_1 + EK_1 + H_1 + \Delta Q = EP_2 + EK_2 + H_2 + \Delta w_{net} \quad (2.15)$$

ΔEP (energi potensial) = 0, karena ketinggian stasion masuk dan keluar sama
 ΔEK (energi kinetik) = kecil dan dapat diabaikan, memang terjadi perubahan kecepatan yang cukup besar, tetapi karena sistemnya kecil dan massanya kecil, karena itu perubahan energi kinetiknya juga kecil.

$\Delta Q = 0$, karena tidak ada kalor yang masuk dan keluar.

$\Delta W_{net} = 0$, karena tidak ada kerja yang dilakukan oleh dan terhadap sistem.

Jadi
$$H_1 = H_2 \quad (2.16)$$

dan ,
$$h_1 = h_2 \quad (2.17)$$

$$\text{Entalpi (h)} = U + PV \text{ atau } u + Pv \quad (2.18)$$

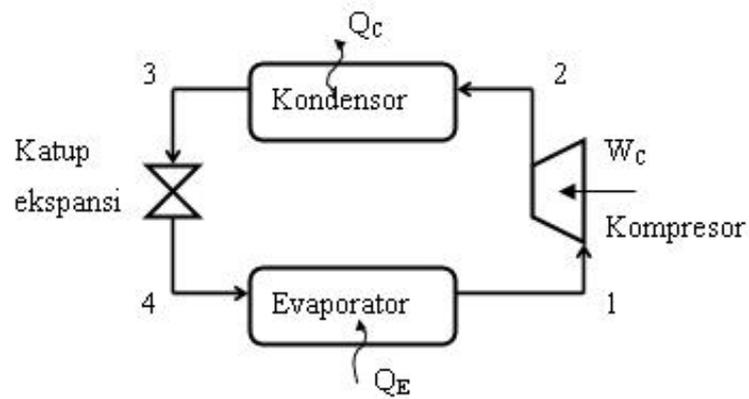
Jadi, proses *throttling* merupakan proses dengan entalpi tetap, akan tetapi di dalamnya terjadi perubahan energi dalam dan energi aliran karena perubahan tekanan dan temperatur. Selain itu, sebenarnya terdapat pula perubahan energi kinetik, tapi nilainya cukup kecil dibandingkan dengan perubahan energi dalam dan energi alirannya.

2.4 SISTEM REFRIGERASI

Saat ini mesin refrigerasi yang paling banyak digunakan di dunia adalah dari jenis siklus kompresi uap. Sistem lain, seperti sistem *magneto-kalorik*, *absorpsi*, *adsorpsi*, dan efek *siebeck* hingga saat ini masih terbatas penggunaannya. Mesin refrigerasi siklus kompresi uap memiliki fleksibilitas penggunaan, yakni bisa berfungsi sebagai mesin pendingin (AC) ataupun pompa kalor (*heat pump*) dengan mengubah arah aliran *refrigerant*-nya. Mesin refrigerasi jenis ini juga berukuran cukup kompak, sehingga tidak memerlukan ruang yang besar.

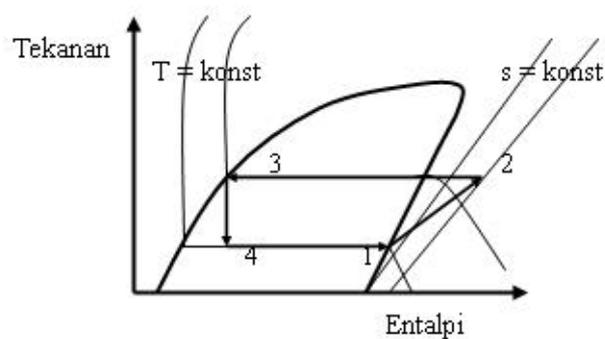
Mesin refrigerasi kompresi uap terdiri atas empat komponen utama, yakni kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan *evaporator*. Kondensor dan *evaporator* sesungguhnya merupakan penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi mempertukarkan kalor diantara dua fluida, yakni antara *refrigerant* dengan fluida luar (bisa berupa air ataupun udara). Kondensor berfungsi untuk proses kondensasi yang terjadi pada temperatur dan tekanan tinggi, dimana sejumlah kalor dilepaskan oleh *refrigerant* ke dalam medium air sehingga

refrigerant berubah fase menjadi cair. Dan *evaporator* berfungsi untuk proses penguapan *refrigerant* dimana kalor tersebut diambil dari udara yang mengalir melalui pipa dan sirip *evaporator*. Sedangkan katup ekspansi berfungsi untuk menurunkan tekanan tinggi ke tekanan yang lebih rendah dimana *refrigerant* dalam keadaan cair bertekanan tinggi diekspansi sedemikian rupa sehingga tekanan *refrigerant* setelah melewati katup ekspansi sama tekanannya dengan evaporator. Skema mesin refrigerasi ini dapat dilihat pada gambar 1.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Skema mesin refrigerasi siklus kompresi uap

Sedangkan diagram tekanan–entalpi yang menjelaskan proses pada mesin refrigerasi siklus kompresi uap bisa dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram tekanan–entalpi pada proses refrigerasi siklus kompresi uap

Pada proses 1–2, kompresor menaikkan tekanan uap *refrigerant*. Kenaikan tekanan ini diikuti dengan kenaikan temperatur uap *refrigerant*. Pada tingkat keadaan (TK) 2, uap *refrigerant* berada pada kondisi uap panas. Pada proses 2–3, uap *refrigerant* memasuki kondensor dan mendapatkan pendinginan dari kondensor. Pendinginan ini terjadi akibat pertukaran panas antara uap *refrigerant* dengan fluida luar (misalnya udara lingkungan ataupun air pendingin). *Refrigerant* keluar dari kondensor pada TK 3 dalam kondisi cair jenuh, atau bisa juga pada kondisi cair dingin. *Refrigerant* kemudian memasuki katup ekspansi. Katup ekspansi ini pada prinsipnya berupa penyempitan daerah aliran yang berakibat pada penurunan tekanan fluida secara drastis. Idealnya, *refrigerant* melalui katup ekspansi (proses 3–4) secara iso-entalpi (isentalpi). Pada TK 4, *refrigerant* berada dalam kondisi campuran cair dan uap. Karena *refrigerant* berada pada tekanan jenuhnya (tekanan penguapan), maka dia akan mengalami penguapan, hukum alam menyatakan bahwa penguapan membutuhkan energi, terjadilah penyerapan energi thermal dari luar evaporator yang menyebabkan efek pendinginan oleh mesin refrigerasi. Kemampuan/prestasi pendinginan dinyatakan dengan $COP = \frac{Q_E}{W_C}$, COP (tak bersatuan) singkatan dari *Coefficient of Performance*, Q_E adalah perpindahan panas pada *evaporator*, dan W_C adalah kerja kompresor.

Perpindahan panas pada *evaporator* digunakan untuk mengkondensasi uap didalam tabung vakum. Perpindahan panas yang diserap oleh *refrigerant* pada *evaporator* sama dengan perpindahan panas yang diterima uap air hasil proses *throttling* di dalam tabung vakum.

Sesuai asas black maka:

$$Q_{evaporator} = Q_{kondensasi} \quad (2.19)$$

$$COP \times W_{komp} = m_{uap} \times h_{fg \text{ Vakum}} \quad (2.20)$$

Maka massa uap yang dapat dikondensasi oleh *evaporator* adalah

$$m_{uap} = \frac{COP \times W_{komp}}{h_{fg \text{ Vakum}}} \quad (2.21)$$

2.5 POMPA AIR

Pompa merupakan salah satu alat yang berfungsi untuk mengalirkan fluida dari potensial rendah ke potensial yang lebih tinggi dengan menggunakan gerak putaran dari blades dan arah aliran sejajar dengan sumbu porosnya. Karena adanya perputaran dari *blades* yang mempunyai kedudukan sudut tertentu sehingga tekanan dari sisi hisap blades pada daerah inlet menjadi lebih rendah, akibatnya fluida mengalir ke sisi hisap blades yang selanjutnya masuk ke sisi tekan *blades* pada tekanan outlet yang lebih tinggi sehingga fluida mengalir ke tekanan yang lebih rendah^[4].

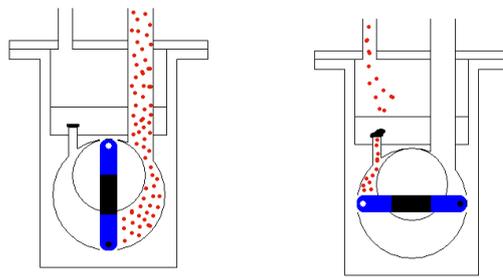
$$W_{pompa} = Q \times H \times \rho \times g \quad (2.22)$$

Dengan :

- Q = kapasitas aliran fluida (m^3/s)
- H = *head* pompa (meter)
- ρ = massa jenis fluida (Kg/m^3)
- G = gravitasi bumi (m/s^2)

2.6 POMPA VAKUM

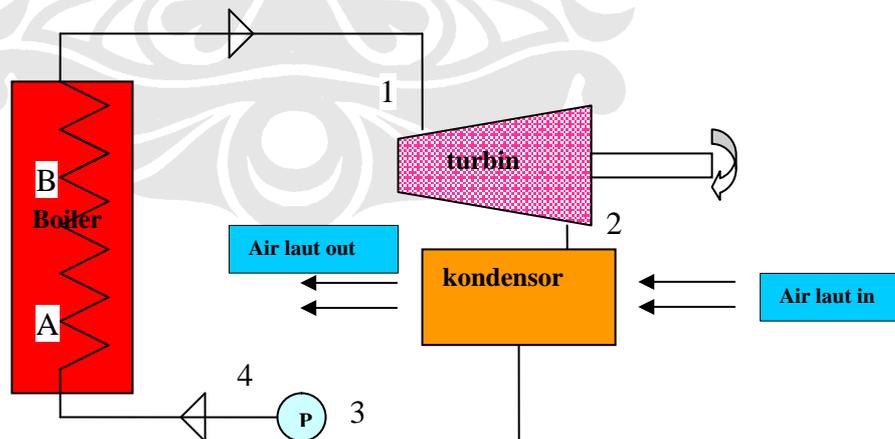
Vakum merupakan kondisi dimana suatu ruang terdapat sedikit atau tidak terdapat molekul gas/udara. Untuk membuat suatu kevakuman dalam sistem diperlukan perbedaan tekanan untuk memindahkan molekul gas yang ada dalam sistem keluar sistem. Tekanan yang lebih rendah memiliki jumlah molekul yang lebih sedikit dibandingkan tekanan tinggi. Karena itu, diperlukan suatu alat yang dapat membuat dan menjaga suatu perbedaan tekanan antara dua ruang yang disebut pompa vakum. Terdapat dua jenis pompa vakum, yaitu *transfer pumps* and *trapping pumps*. *Transfer pumps* disebut juga *kinetic pumps* karena memberikan momentum kepada gas/udara dengan cara mengekspansi sehingga gas/udara dapat dihisap secara terus-menerus masuk melalui katup hisap pompa dan keluar menuju katup keluar pompa. Rotor yang terdapat didalam pompa bergerak rotasi sehingga menghasilkan tekanan rendah didalam pompa untuk menghisap udara secara terus menerus sehingga udara didalam suatu ruangan keadaannya vakum. Setelah mencapai titik vakum maksimum, katup tertutup agar gas yang berada pada tekanan yang lebih tinggi (luar ruangan) tidak masuk kembali kedalam ruangan vakum.



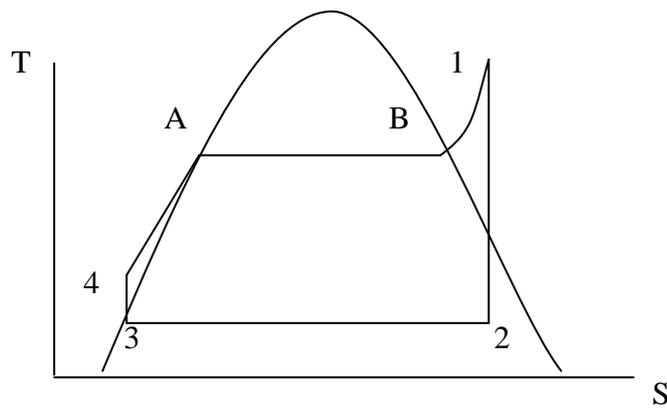
Gambar 2.6. Pergerakan rotasi rotor pompa menghisap udara/gas

Trapping atau *capture* pumps pada umumnya terletak didalam ruangan. *Trapping* or *capture* pumps akan memindahkan molekul udara/gas dengan cara *sorption* atau *condensation* pada bagian dalam permukaan gas tersebut. Jika molekul gas bereaksi dengan material yang internal pompa secara kimiawi, material yang baru yang diciptakan oleh reaksi gas dan molekul material bagian dalam akan disimpan dalam pelat film tipis. Hal inilah yang disebut sorption molekul gas. Lagipula, jika molekul gas yang masuk dan bersentuhan dengan permukaan yang didinginkan pompa, gas akan dikondensasi dan dipindahkan dalam bentuk cairan.

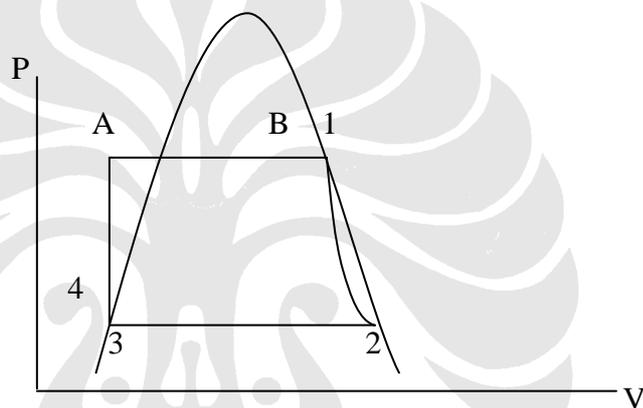
2.7 SIKLUS PLTU



Gambar 2.7. Siklus PLTU



Gambar 2.8. T-S Diagram untuk siklus rankine



Gambar 2.9. P-V Diagram untuk siklus rankine

Siklus PLTU :

- 4-A = 4 merupakan proses membawa cairan dingin lanjut menjadi cairan jenuh pada B dalam ekonomisator.
- A-B = merupakan pemanasan cairan jenuh menjadi uap jenuh pada tekanan dan suhu tetap karena campuran dua fase pada boiler.
- B-1 = pemanasan lanjut oleh superheater menjadi uap panas pada tekanan tetap.
- 1-2 = ekspansi mampu balik oleh turbin, uap keluar pada 2 menjadi dua fase uap dan air pada kondensor.
- 2-3 = proses dua fase pada suhu dan tekanan tetap pada kondensor sekaligus pembuangan panas kondensor ke laut.
- 3-4 = kompresi adiabatik oleh pompa pada cairan jenuh pada tekanan kondensor 3 menjadi cairan dingin lanjut pada tekanan pembangkit.

Analisa siklus tersebut dapat ditentukan secara sederhana atas dasar satuan massa uap jenuhnya yaitu ^[3]:

- Kalor yang ditambahkan pada boiler (q_{in}) = $h_1 - h_4$ (kj/kg) (2.23)

- Kerja turbin (w_T) = $h_1 - h_2$ (kj/kg) (2.24)

- Kalor yang dibuang oleh kondensor (q_{out}) = $h_2 - h_3$ (kj/kg) (2.25)

- Kerja pompa (w_p) = $h_4 - h_3$ (kj/kg) (2.26)

- Kerja netto (Δw_{net}) = $(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$ (kj/kg) (2.27)

- Efisiensi thermal (η_{th}) = $\Delta w_{net}/q_{in} \times 100\%$ (2.28)

Berdasarkan hubungan PLTU dengan penulisan ini adalah pemanfaatan air laut buangan kondensor. Tugas utama kondensor adalah untuk mengembunkan uap buangan turbin dengan demikian dapat memulihkan air umpan berkualitas tinggi untuk dipakai lagi dalam siklus tersebut. Dalam melaksanakan hal tersebut, kondensor juga melaksanakan fungsi lain yang malah lebih penting yaitu, jika suhu air laut pendingin lebih rendah akan menimbulkan tekanan balik yang rendah (vakum) untuk menghisap uap keluar dari turbin. Tekanan ini sama dengan tekanan-jenuh yang sehubungan dengan suhu entalpi, oleh karena itu juga kerja turbin persatuan penurunan tekanan jauh lebih besar pada bagian tekanan rendah daripada ujung yang bertekanan tinggi.

Dengan demikian, dengan menurunkan tekanan hilir beberapa psia saja dapat meningkatkan efisiensi dan aliran uap-pun berkurang untuk suatu keluaran instalasi yang tetap. Makin rendah tekanan maka makin besar efek ini. Jadi dari segi termodinamika, penting sekali menggunakan suhu air pendingin serendah mungkin.