

II. DASAR TEORI

2. 1. Hukum termodinamika dan sistem terbuka

Termodinamika teknik dikaitkan dengan hal-hal tentang perpindahan energi dalam zat kerja pada suatu sistem. Sistem merupakan susunan seperangkat unsur yang secara teratur saling berkaitan sehingga membentuk suatu keseluruhan. Ada 2 sistem yang dikenal ; sistem tertutup dan sistem terbuka. Sistem tertutup, sistem yang mana suatu massa yang konstan yang dilingkupi suatu batas, contoh ; udara yang ditekan oleh piston dalam silinder, dll. Sedangkan sistem terbuka, sistem yang massa mengalir / melewati suatu batas. sistem tertutup, contoh ; water heater, radiator, kompressor, nozzle, dll.

Volume kendali juga disebut sistem terbuka. Suatu volume kendali merupakan suatu daerah didalam ruang dan bermanfaat dalam analisis terhadap situasi dengan terjadinya aliaran-aliran kedalam serta keluar dari ruang tersebut. Batas suatu volume kendali adalah permukaan kendali. Pengertian volume kendali digunakan dalam penurunan persamaan ; kontinuitas, energi, momentum. Misalkan N adalah jumlah total suatu sifat (massa, energi, momentum didalam sistem itu pada waktu t , dan misalkan h jumlah sifat per massa satuan. Maka laju pertambahan N terhadap waktu suatu system adalah tepat sama dengan laju pertambahan terhadap waktu untuk sifat N didalam volume kendali ditambah dengan laju bersih aliran-keluar N melintasi volume kendali.

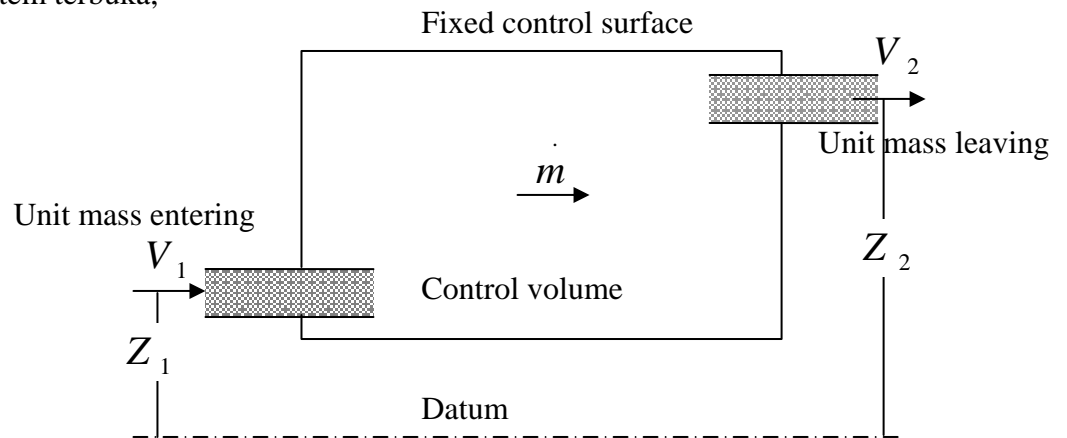
$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vk} h r d n + \int_{pk} h r u . d A$$

Maka persamaan energi,
$$\frac{dQ_H}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vk} r e d n + \int_{pk} \left(\frac{p}{r} + e \right) r u . d A \quad (2.1)$$

dimana $N = E$ dan $h = \frac{r e}{r}$.

Untuk system tertutup, massa tetap konstan terhadap waktu, tidak perubuhan energi kinetik dan potensial. Sehingga persamaan energi, $Q - W = \Delta U$

Untuk system terbuka,



Gambar 2.1 Bagan Sistem Aliran Tunak Dengan Satu Aliran Masuk Dan Keluar

\dot{m} = mass flow per satuan waktu. Jika aliran diassumsikan steady flow, maka persamaan (2.1), menjadi persamaan aliran energi,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \Delta e \quad (2.2)$$

yang berarti panas Q yang diberikan ke system dikurangi dengan kerja W yang dilakukan system hanya bergantung paada keadaan awal dan keadaan akhir system itu. Perpindahan kerja, $\dot{m} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$ maka aliran energi total,

$\dot{W} = \dot{W}_x + \dot{m}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$ dimana \dot{W}_x = aliran perpindahan kerja efektif dari system. Dalam system aliran, perubahan energi ; kinetic, potensial, dalam sama dengan $\dot{m} \Delta e$

$$\dot{m} \Delta e = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m} \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} \right) + \dot{m}(gZ_2 - gZ_1) \text{ maka persamaan (2.2) menjadi}$$

$$\dot{Q} - \{ \dot{W}_x + \dot{m}(p_2 v_2 - p_1 v_1) \} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m} \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} \right) + \dot{m}(gZ_2 - gZ_1) . \text{ Karena}$$

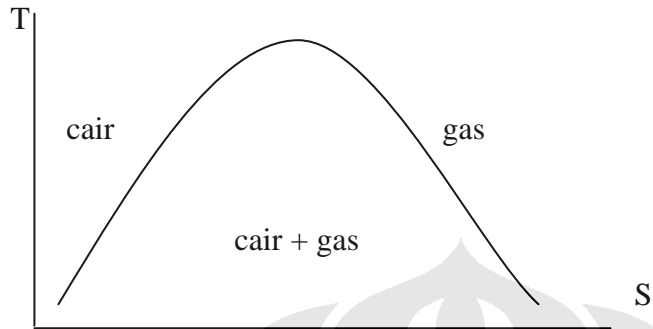
$u_1 + p_1 v_1 = h_1$ dan $u_2 + p_2 v_2 = h_2$ maka persamaan energi aliran steady,

$$\dot{Q} - \dot{W}_x = \dot{m} \Delta \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ \right) \quad (2.3)$$

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

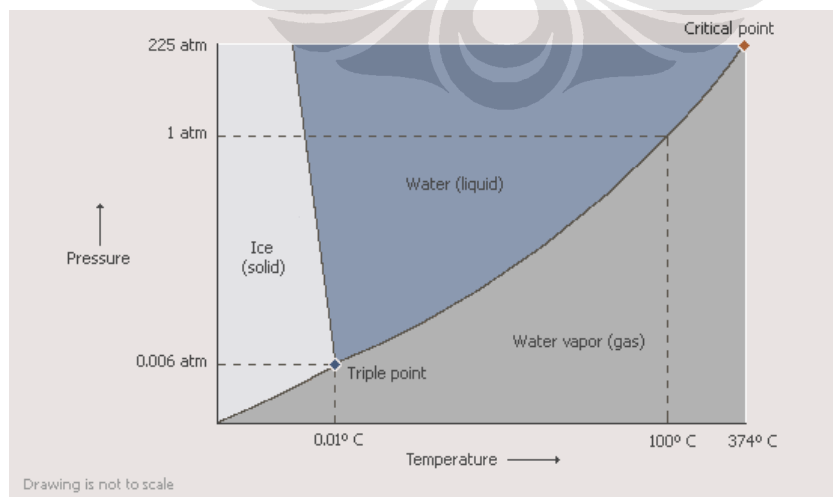


gambar 2.2 T-S Diagram Fluida Air

dimana daerah disebelah kiri kubah merupakan daerah fase cair dan garis kubah merupakan fasa jenuh cair. Sedangkan daerah di sebelah kanan kubah merupakan daerah fase gas dan garis kubah 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 pascals (0.0060373057 atm).



Gambar 2.3 Fase Diagram Air

2. 3. Proses Throthling

Sebuah katup tidak menghasilkan kerja, alat ekspansi adiabatik yang perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan. Dalam proses ini entalpi konstan, tetapi secara analisa, sebenarnya terjadi perubahan energi dalam (Δu) dan energi alirannya (Pv) karena terjadi perubahan tekanan dan temperature.

$$\dot{Q} - \dot{W}_x = m\Delta\left(h + \frac{V^2}{2} + gZ\right)$$

ΔgZ (energi potensial) = 0, karena ketinggian stasion masuk dan keluar sama

$\Delta \frac{V^2}{2}$ (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 $H_1 = H_2$

dan $h_1 = h_2$ (2.4)

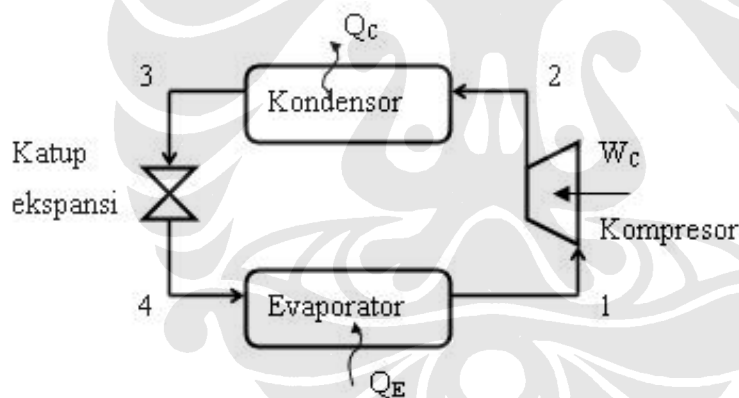
Entalpi = $U + PV$ atau $u + Pv$

Jadi, proses throthling 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

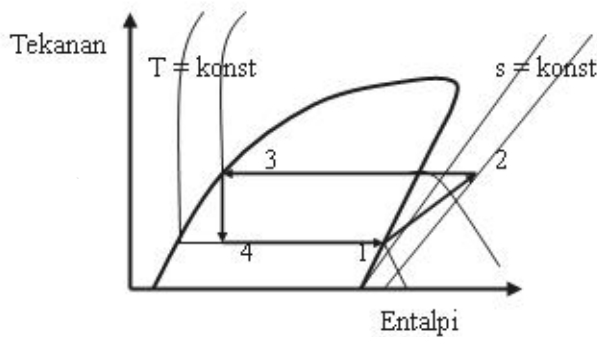
Saat ini mesin refrigerasi yang paling banyak digunakan di dunia adalah dari jenis siklus kompresi uap. Sistem lain, seperti sistem magneto-kalorik, absorpsi, adsorpsi, dan efek Siebeck hingga saat ini masih terbatas penggunaannya. Mesin refrigerasi siklus kompresi uap memiliki fleksibilitas penggunaan, yakni bisa berfungsi sebagai mesin pendingin (AC) ataupun pompa kalor (heat pump) dengan mengubah arah aliran refrigerannya. 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 termal 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 throattling didalam tabung vakum.

Sesuai asas black maka:

$$Q_{\text{evaporator}} = Q_{\text{kondensasi}} \quad (2.5)$$

$$C_p \times W_{\text{komp}} = m_{\text{uap}} \times h_{\text{fg vakum}} \quad (2.6)$$

Maka massa uap yang dapat dikondensasi oleh evaporator adalah

$$m_{\text{uap}} = \frac{C_p \times W_{\text{komp}}}{h_{\text{fg vakum}}} \quad (2.7)$$

2. 5. Kipas

Perpindahan kalor dengan konveksi dibedakan menjadi dua, jenis pertama diakibatkan karena perbedaan densitas fluida (akibat beda suhu antara bagian fluida dan kelilingnya) dinamakan perpindahan kalor konveksi alami (*natural convection*), dan jenis yang kedua karena fluida tsb. dipaksa bergerak (dengan menggunakan pompa atau fan) dinamakan perpindahan kalor konveksi paksaan (*forced convection*). Keduanya dinamakan perpindahan kalor karena konveksi.

Bertambah besar aliran fluida, bertambah besar pula perpindahan kalornya (akibat konveksi). Perpindahan kalor pada cairan sangat besar dibandingkan dengan gas. Biasanya, fluida yang memiliki koefisien konduksi yang besar menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang besar juga.

Reynold number

$$G = Q / (Ac \times \sigma) \quad (2.8)$$

Q = debit air

Free frontal udara (σ)

Area frontal dari core

Fouling factor air didapat dari Nr

$$Nr = 4 rh Gg/\mu g \quad (2.9)$$

Rh = hydraulic radius pada air

L = tinggi pendingin

$$\text{Maka } \Delta P = G^2 \times v \times f \times L / (2 gc \times rh) \quad (2.10)$$

ΔP merupakan beban udara yang digerakkan oleh kipas melewati pendingin

2. 6. Pompa

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 suction menjadi lebih rendah, akibatnya fluida mengalir ke sisi hisap blades yang selanjutnya masuk ke sisi tekan blades pada tekanan discharge yang lebih tinggi sehingga fluida mengalir ke tekanan yang lebih rendah.

$$\text{Daya pompa} = Q \times H \times \rho \times g \quad (2.11)$$

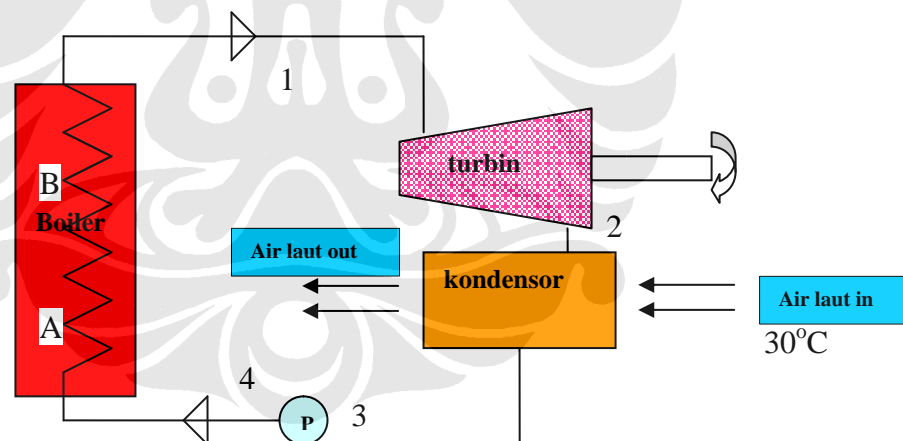
Dengan : Q = kapasitas aliran fluida (m^3/s)

H = head pompa (meter)

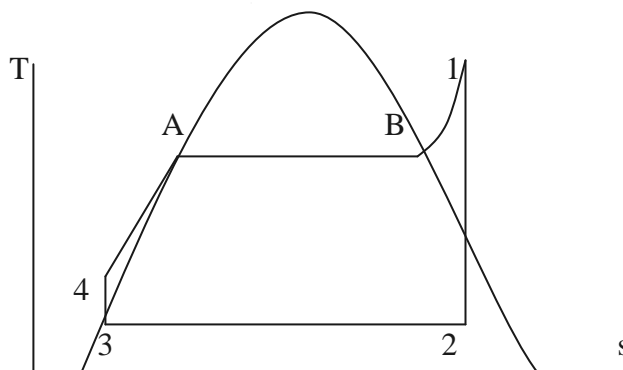
ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

G = gravitasi bumi (m/s^2)

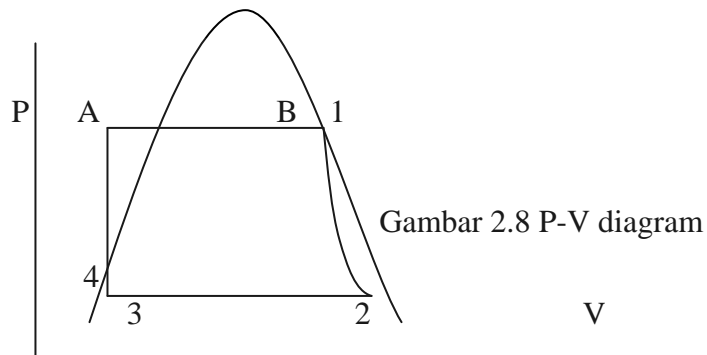
2. 7. Sistem pembangkit PLTU



Gambar 2.6 siklus PLTU



Gambar 2.7 T-S diagram



Siklus PLTU :

- 4-A = 4 merupakan proses membawa cairan dingin 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 lanjut pada tekanan pembangkit.

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.