

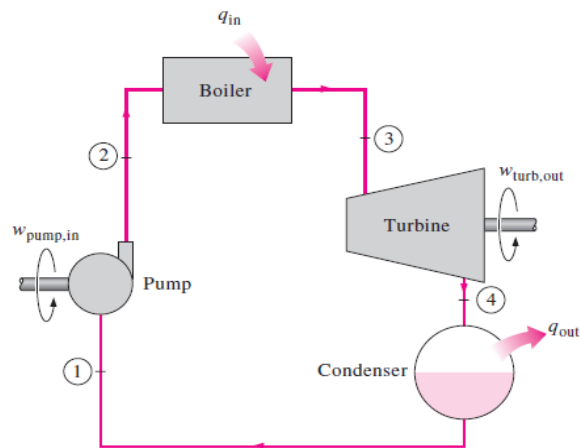
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Siklus Rengkin Regeneratif

Dalam pembangkit listrik tenaga uap, energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), dan gas.

Konversi energi tingkat pertama yang terjadi di pembangkit listrik tenaga uap adalah konversi energi primer menjadi energi panas (Kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam *steam* drum. Uap dari *steam* drum dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan akhirnya energi mekanik dari turbin uap dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Secara skematis proses pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada Gambar 1.



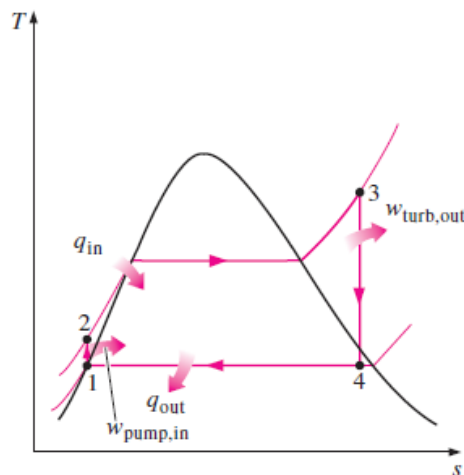
Gambar 1. Skematik pembangkit listrik tenaga uap  
(Cengel dan Boles, 2006)

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus Rankine. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika, siklus uap

dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal.

Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus Carnot dapat dicapai pada daerah uap basah dimana perubahan entalpi fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperatur. Temperatur hanya diatur oleh tekanan uap fluida.

Kerja pompa pada siklus Rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus Carnot. Siklus Rankine ideal dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Siklus Rankine Sederhana  
(Cengel dan Boles, 2006)

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses :

- 1-2 kompresi isentropik dengan pompa
- 2-3 penambahan panas dalam boiler secara isobar
- 3-4 ekspansi isentropik pada turbin
- 4-1 pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isothermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi sampai tekanan operasi boiler. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki boiler sebagai

cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap superheated pada kondisi 3. Dimana panas diberikan ke boiler pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang menghasilkan uap ini disebut *uap generator*. Uap superheated pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari *uap* akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *uap* akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Uap* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini (Cengel dan Boles, 2006)

## 2.2 Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan steam. Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin 2009: 13). Boiler mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. Boiler dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan (*feed water system*), sistem steam (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*). Sistem air umpan (*feed water system*) menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem steam (*steam sistem*) mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar (*fuel sistem*) adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

Boiler berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas. Boiler terdiri dari 2 komponen utama, yaitu:

1. Dapur sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
2. Alat penguap (evaporator) yang mengubah energi pembakaran (energi panas) menjadi energi potensial uap (energi panas).

Kedua komponen tersebut dia atas telah dapat untuk memungkinkan sebuah boiler untuk berfungsi.

Boiler pada dasarnya terdiri dari bumbungan (drum) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung kepada sudut pandang masing-masing.

### **2.3 Penggunaan Boiler**

Dengan sebuah boiler atau pembangkit uap energi bahan bakar dapat diubah menjadi energi uap yang dapat dimanfaatkan. Pada boiler yang menggunakan bahan bakar biasanya terjadi banyak kehilangan panas. Tidak dapat disangkal lagi bahwa monitoring secara berkala dan menjaga boiler beroperasi pada tingkat efisiensi yang optimal adalah penting sekali. Berikut ini hal yang perlu diperhatikan pada pengoperasian boiler :

#### **a. Air Umpan Boiler**

Dari segi pengelolaan energi, pemurnian air adalah hal yang sangat penting pada boiler. Hal ini dikarenakan padatan yang terlarut cenderung untuk mengendap pada dasar dan dinding boiler yang selanjutnya mengakibatkan turunnya efisiensi operasi boiler. Dua sumber air umpan adalah:

- Kondensat atau steam yang mengembun yang dikembalikan dari proses.
- Air makeup (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses

#### **b. Tangki Air Pengisi Boiler**

Merupakan bagian yang integral dari suatu instalasi boiler dan harus dapat menampung setiap kondensat tanpa kehilangan uap yang akan menurunkan beban

boiler. Tangki tersebut haruslah selalu dipasangi dengan suatu tutup untuk menekan kehilangan panas permukaan dan tangki dengan ukuran yang besar haruslah sepenuhnya diberi isolasi.

c. Pemanfaatan Kembali Panas Air Buangan

Pada beberapa instalasi, pengeluaran sebagian air boiler dilakukan secara teratur selama operasi boiler berjalan normal. Ini dimaksudkan untuk membuang endapan dari boiler yang besar, untuk menjaga daya hantar boiler atau untuk membuang uap dari *autoclave* dan dari proses siklus yang lain. Air dan uap yang dibuang melalui pembuangan boiler (*blowdown*) mengandung panas yang dapat dimanfaatkan kembali dan seharusnya bisa digunakan untuk pemanasan pendahuluan air umpan boiler (*feed water*) atau air untuk proses dengan menggunakan penukar panas (*heat exchanger*)

d. Tekanan Operasi

Pada setiap sistem uap, tekanan menentukan suhu dan suhu menentukan panas yang hilang dari sistem. Disamping itu bila uap bertekanan tinggi digunakan untuk proses bertekanan rendah, timbul panas lanjut (*superheat*) yang mungkin tidak diinginkan untuk proses tersebut. Berdasarkan hal-hal tersebut diatas, maka boiler tidak boleh dioperasikan pada tekanan yang jauh lebih besar dari tekanan tertinggi proses. Dan tekanan proses haruslah tidak melebihi besarnya tekanan yang diperlukan untuk melaksanakan proses tersebut. Dalam beberapa hal mungkin lebih baik bila dipergunakan beberapa boiler yang dapat dioperasikan sendiri-sendiri atau paralel bersamaan, manakala proses-proses yang dilaksanakan memerlukan berbagai tekanan yang amat berbeda.

e. Panas Hilang Awal Operasi

Untuk suatu operasi, ada boiler yang berukuran besar dan ada juga yang berukuran kecil. Perbedaan ukuran terletak pada banyaknya air yang disimpan didalam drum boiler. Boiler bahan bakar umunya berukuran besar karena membutuhkan permukaan luas yang kontak dengan nyala api. Boiler listrik, sebaliknya cenderung berukuran kecil karena elemen pemanasnya bentuknya sangat kompak dan membutuhkan hanya sedikit air untuk bisa tercelup total.

Keuntungan boiler berukuran besar ialah kapasitasnya besar untuk menghasilkan uap dengan sedikit penurunan tekanan (*flash off steam*), dan karenanya cocok untuk penyediaan kebutuhan besar yang tiba-tiba. Dalam beberapa macam pemakaian, hal ini merupakan suatu karakteristik yang menguntungkan, namun ketel uap ini juga mempunyai kelemahan, karena ketel uap ini membutuhkan waktu dan energi yang banyak untuk mencapai tekanan operasi sejak mulai dipanaskan.

Untuk sistem kerja yang menggunakan satu atau dua gilir tenaga kerja, energi yang dibutuhkan untuk *star up* umumnya dianggap sebagai panas yang hilang, karena pada malam hari panas ini biasanya hilang begitu saja. Waktu yang dibutuhkan untuk *star up* berkisar antara 5 menit sampai 2 jam.

#### f. Penyimpanan Uap

Suatu alternatif yang lebih baik yang sering diterapkan pengganti boiler besar ialah pemasangan suatu boiler yang lebih kecil yang dihubungkan dengan suatu penyimpanan uap. Meskipun cara ini mengakibatkan naiknya total untuk biaya instalasi tersebut, tetapi cara ini mempunyai kombinasi keuntungan dari waktu *star up* yang cepat dan kesiapan tersedianya panas setiap uap diperlukan.

#### g. Panas Hilang Boiler Uap Saat Tanpa Beban

Merupakan hal yang biasa bahwa boiler dibiarkan beroperasi untuk waktu yang lama tanpa adanya beban yang berarti. Selama waktu ini terjadi panas hilang yang cukup banyak. Sebagai contoh misalnya pada pembersihan kering pabrik dimana boiler dioperasikan sepanjang hari untuk jam operasi ternyata yang terpakai hanya dua atau tiga jam saja.

Dengan jadwal kerja yang terencana, bisa saja pemakaian uap dibatasi untuk beberapa jam yang perlu saja dan selanjutnya boiler bisa dimatikan. Bahkan waktu istirahat makan siang, adalah lebih ekonomis bila katup boiler ditutup dan pemanas boiler dimatikan saja. Pemasangan boiler tepat di tempat-tempat proses, mempermudah cara mematikan boiler tersebut apabila proses yang berkenaan tidak lagi memerlukan uap.

#### h. Efisiensi Pembakaran dan Kelebihan Udara

Pada boiler listrik, semua energi yang disuplay diteruskan ke air, tetapi pada ketel uap bahan bakar 20% atau lebih dari energi yang diberikan bahan bakar terbuang melalui gas buang boiler (*flue gas*). Sayangnya, gas buang ini merupakan suatu ketentuan dasar tercapainya pembakaran yang baik. Umumnya diperlukan suplay udara yang berlebih, sekitar 10% untuk gas, 20% untuk bahan bakar minyak dan 40% bahan bakar padat guna mencapai pembakaran bahan bakar yang komplit. Dan hal ini diukur sebagai persentase CO<sub>2</sub> didalam gas buang. Efisiensi maksimum harus dicapai dengan suhu minimum gas buang sekitar 200 – 250 °C, suhu yang selalu diatas titik embun, guna mengurangi terjadinya korosi.

#### **2.4 Fire Tube Boiler (Boiler Pipa Api)**

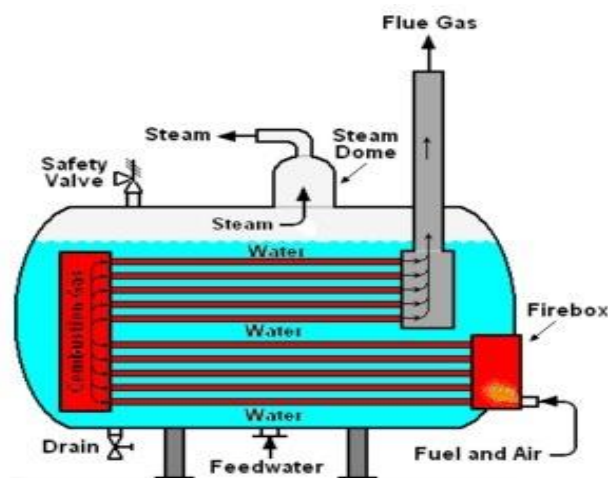
Pada fire tube boiler, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam shell untuk dirubah menjadi steam. Fire tube boilers biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, fire tube boilers kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm<sup>2</sup>. Fire tube boilers dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar fire tube boilers dikonstruksi sebagai “ paket” boiler (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.

Boiler jenis ini pada bagian tubenya dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainnya yaitu sell dialiri air yang akan diuapkan. Tube-tubunya langsung didinginkan oleh air yang melindunginya. Jumlah pass dari boiler tergantung dari jumlah laluan horizontal dari gas pembakaran diantara furnace dan pipa-pipa api. Laluan gas pembakaran pada furnace dihitung sebagai pass pertama. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah.

Konstruksi boiler pipa api terdiri dari sebuah silinder atau tangki berisi air dimana didalam tangki tersebut terdapat susunan *tube* yang dialiri oleh gas asap. Pipa *tube* ini merupakan pengembangan ketel uap lorong api dengan pengembangan sebagai berikut :

- Volume kecil (isi air ketel)
- Luas bidang pemanas dapat diusahakan lebih besar
- Ruang aliran gas asap dapat diusahakan lebih besar sehingga aliran gas asap tidak cepat keluar dari ketel uap.

Pada ketel pipa api, nyala api dan gas panas yang dihasilkan pembakaran, mengalir melalui pipa yang dikelilingi oleh air. Panas dikonduksikan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut. Untuk lebih jelasnya, boiler pipa api dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 . Boiler pipa api

( <http://www.artikel-teknologi.com> )

## 2.5 Definisi Turbin Uap

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan.

Pengertian energi potensial uap adalah direpresentasikan dalam *property* (sifat) uap yang menggerakkan turbin, dalam hal ini sifat uap adalah : tekanan, temperatur, *enthalpy*. Sedangkan energi gerak putar poros adalah besaran momen putar yang ditimbulkan oleh gaya dorong uap pada sudu gerak turbin. Transformasi energi pada sudu gerak turbin adalah perubahan energi kinetik (kecepatan) uap yang masuk dan keluar sudu.



## 2.6 Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap ada bermacam-macam jenis sesuai dengan kegunaannya, apabila digunakan untuk penggerak daya kecil maka lebih dipilih tingkat tunggal sampai tiga tingkat. Akan tetapi bila untuk menggerakkan daya yang besar lebih dipilih turbin multi stage sampai *Tandem Compound*.

Jenis-jenis Turbin Uap dapat digolongkan atas dasar sebagai berikut :

### 2.6.1 Berdasarkan proses transformasi energi uap :

- a. Turbin Impuls, yaitu turbin yang ekspansi uap terjadi pada sudu tetapnya. Turbin impulse pertama kali dibuat oleh Branca pada tahun 1629. Turbin Impuls juga ada beberapa macam diantaranya:
  - Turbin Impuls bertingkat kecepatan. Turbin kecepatan bertingkat (curtis) adalah jenis turbin yang mana kecepatan aliran uap yang mengalir di dalamnya bertingkat sedangkan tekanannya tetap.
  - Turbin Impuls bertingkat tekanan. Turbin tekanan bertingkat (rateau) adalah jenis turbin yang mana kondisi tekanan uap yang mengalir di dalamnya bertingkat sedangkan kecepatannya tetap.
- b. Turbin Reaksi, yaitu turbin yang ekspansi uap terjadi pada sudu tetap dan sudu jalan. Turbin ini dirancang pertama oleh Hero, 120 tahun sebelum Masehi

### 2.6.2 Berdasarkan tekanan uap keluar turbin :

- a. Turbin *Back Pressure* adalah turbin yang tekanan akhirnya diatas tekanan atmosfer karena uap keluaran akhir dari turbin tersebut tidak dikondensasikan.
- b. Turbin *Condensing* adalah turbin yang mana uap keluaran sudu terakhirnya dikondensasikan, tekanan akhir dari turbin kondensasi ini dibuat vacuum, sehingga temperature kondensasinya sedikit diatas temperatur air pendingin yang tersedia.

### 2.6.3 Berdasarkan tekanan uap masuk turbin :

- a. Turbin Tekanan Super Kritis (*Super Critical Pressure Turbines*) tekanan uap diatas 22,5 MPa
- b. Turbin Tekanan Tinggi (*High Pressure Turbines*) tekanan uap antara 8,8 – 22,5MPa
- c. Turbin Tekanan Menengah (*Intermediate Pressure Turbines*) tekanan uap antara 1 – 8,8 MPa
- d. Turbin Tekanan Rendah (*Low Pressure Turbines*) tekanan dibawah 1 Mpa.

### 2.6.4 Berdasarkan pengaturan uap masuk turbin :

- a. Turbin pemasukan penuh (*Full Admission Turbines*) : Uap yang masuk turbin melalui katup masuk pada posisi buka penuh (*full Open*)/posisi pembukaannya tetap sedangkan pengaturan daya turbin dengan cara menaikkan tekanan uap utama yang menyebabkan kenaikan masa alir uap yang masuk ke turbin. Hal ini menyebabkan kenaikan/penurunan daya turbin fungsi dari tekanan uap masuk. Turbin semacam ini juga dikenal dengan sebutan *Sliding Pressure Turbines*.
- b. Turbin pemasukan parsial (*Partial Admission Turbines*) : Uap yang masuk turbin melalui katup masuk tidak pada posisi membuka penuh untuk menaikkan/menurunkan daya turbin dengan cara mengatur laju alir uap ke turbin penuh. Pengaturan laju alir uap ke turbin dilakukan dengan dua cara yaitu dengan pengendalian *Throtling Valve* dan dengan pengendalian Nozles.

### 2.6.5 Berdasarkan dari segi aliran uap :

- a. **Turbin Reheat dan Non-Reheat.** Turbin reheat terdiri lebih dari satu silinder dan uap mengalami proses pemanasan ulang di *reheater boiler*. Pada turbin reheat, uap yang keluar dari turbin tekanan tinggi (HP) dialirkan kembali kedalam ketel. Didalam ketel, uap ini dipanaskan kembali pada elemen pemanas ulang (*reheater*) untuk

selanjutnya dialirkan kembali melalui saluran *reheat* ke turbin tekanan menengah dan turbin tekanan rendah.

- b. **Turbin Ekstraksi dan Non-Ekstraksi.** Turbin ekstraksi (*extraction turbine*) adalah turbin yang mengekstrak sebagian uap yang mengalir dalam turbin. Pengekstraksian uap ini dapat dilakukan di beberapa tempat disepanjang casing turbin. Uap yang diekstrak kemudian dialirkan ke pemanas awal air pengisi untuk memanaskan air pengisi. Tekanan dan aliran uap ekstraksi sangat tergantung pada beban. Pada turbin-turbin ekstraksi yang relatif kecil, variasi tekanan dan aliran uap ekstraksi tidak terlalu signifikan sehingga tidak diperlukan katup pengatur pada saluran uap ekstraksinya. Turbin ekstraksi seperti ini disebut turbin ekstraksi otomatis (*Automatic Extraction Turbine*). Tetapi pada turbin ekstraksi yang besar, variasi ini cukup besar sehingga diperlukan katup pengatur pada saluran ekstraksi guna mengontrol tekanan/aliran uap ekstraksi.

Sedangkan pada turbin non ekstraksi, tidak dilakukan ekstraksi uap sama sekali. Jadi seluruh uap yang mengalir masuk turbin non ekstraksi akan keluar meninggalkan turbin melalui exhaust.

#### 2.6.6 Berdasarkan dari segi *Exhaust Flow* :

- a. **Single Flow.** Turbin-turbin kecil biasanya hanya memiliki 1 saluran *exhaust*. Turbin semacam ini biasanya disebut Turbin *Single Flow*. Tetapi untuk turbin-turbin besar, bila menerapkan rancangan seperti ini, maka dibutuhkan *exhaust* yang sangat luas. Sebagaimana diketahui kondisi uap pada *exhaust* turbin sudah dibawah jenuh atau uap basah, dan tekanannya dibawah tekanan atmosfer. Perubahan tekanan dari beberapa puluh bar menjadi tekanan minus mengakibatkan perubahan volume yang sangat besar sehingga dibutuhkan laluan yang luas agar uap dapat melintas tanpa hambatan yang berarti. Karena keterbatasan kemampuan material, luas laluan

*exhaust* juga menjadi sangat terbatas, sehingga kemampuan turbin dengan *exhaust* tunggal juga terbatas.

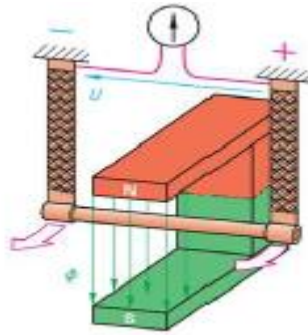
- b. **Multi Flow.** Umumnya dipakai pada turbin kapasitas besar, *exhaust* dipecah menjadi dua atau lebih. Bila ternyata dibutuhkan 2 *exhaust*, berarti keduanya berada dalam satu poros dengan aliran uap yang berlawanan. Rancangan turbin seperti ini disebut turbin *multi flow* (aliran banyak). Dengan cara seperti ini masalah keterbatasan luas laluan *exhaust* dapat diatasi sekaligus memberi pertimbangan terhadap gaya aksial pada poros.

#### 2.6.7 Berdasarkan Casing :

- a. **Turbin Single Casing.** Turbin single casing adalah turbin dimana seluruh tingkat sudu-sudunya terletak didalam satu casing saja. Ini merupakan konstruksi turbin yang paling sederhana yang hanya dapat diterapkan pada turbin-turbin kapasitas kecil.
- b. **Multi Casing.** Untuk turbin-turbin kapasitas yang lebih besar, konstruksi single casing menjadi kurang cocok, maka dibuatlah turbin-turbin dengan 2 casing atau lebih (*multy casing*). Komposisi dari turbin *multy casing* ada 2 macam yaitu : *Tandem Compound* dan *Cross Compound*. Pada turbin *tandem compound*, casing-casing dipasang secara seri antara satu dengan lain sehingga sumbu aksial casing berada dalam 1 garis.

### 2.7 Generator

Generator merupakan sebuah perangkat yang merubah energi mekanis menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator dikenalan Michael Faraday 1832, sebuah kawat penghantar digantung dua ujungnya ditempatkan diantara kutub magnet permanen utara-selatan. Antara kutub utara dan selatan terjadi garis medan magnet. Prinsip generator dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.

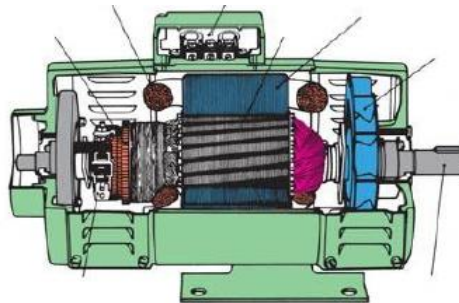


Gambar 4. Prinsip generator

( Rizal, 2013)

Kawat penghantar digerakkan dengan arah panah, maka terjadi di kedua ujung kawat terukur tegangan induksi oleh Voltmeter.

Pada umumnya generator dibuat dengan menggunakan magnet permanen dengan 4 kutub rotor. Gambar 20 menunjukkan potongan melintang konstruksi generator DC. Generator DC terdiri dari dua bagian, yaitu stator yang merupakan bagian mesin DC yang diam, dan bagian rotor merupakan bagian mesin DC yang berputar (Rizal, 2013:156).



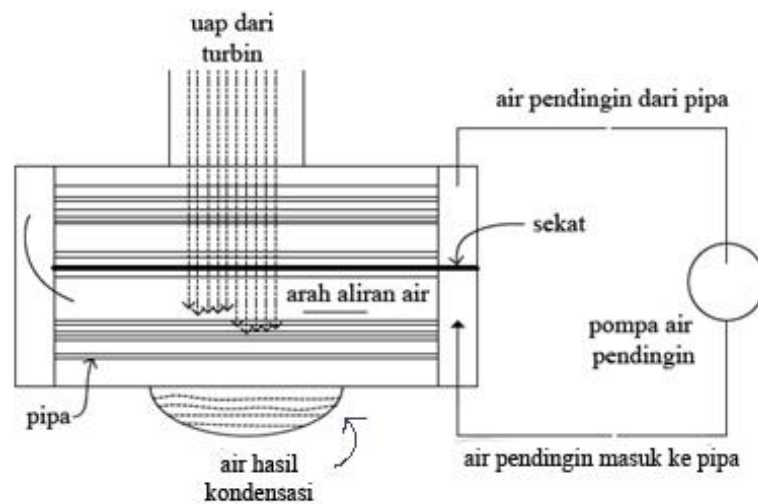
Gambar 5. Kontruksi generator

(Rizal, 2013)

## 2.8 Kondenser

Kondenser merupakan peralatan untuk mengembunkan kembali uap yang telah dimanfaatkan untuk memutar turbin uap. Hal ini diperlukan untuk menghemat sumber air yang ada disekitarnya serta menjamin kemurnian air yang digunakan dalam sistem turbin uap agar tidak terjadi pengendapan maupun kotoran-kotoran yang dapat merusak. Sebagai pendingin kondenser biasanya

menggunakan air dingin (Sianturi, 2008). Untuk lebih jelasnya, sistem kondenser dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Sistem Kondenser

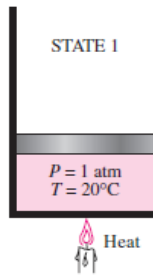
(Sianturi, 2008)

## 2.9 Perubahan Fase Pada Zat Murni

Air dapat berada pada keadaan campuran antara cair dan uap, contohnya yaitu pada boiler dan kondenser dari suatu sistem pembangkit listrik tenaga uap. Dibawah ini akan dijelaskan secara lebih rinci mengenai perubahan fase pada zat murni, contohnya air.

### 2.9.1 Cair Tekan (*Compressed Liquid*)

Untuk memudahkan dalam menjelaskan proses ini maka lihat pada Gambar 7 dimana sebuah alat berupa torak dan silinder yang berisi air pada  $20^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Pada kondisi ini, air berada pada fase cair tekan karena temperatur dari air tersebut masih dibawah temperatur *saturated* pada saat tekanan 1 atm. Kemudian kalor mulai ditambahkan kedalam air sehingga terjadi kenaikan temperatur tersebut maka air secara perlahan berekspansi dan volume spesifiknya meningkat, karena ekspansi ini maka piston juga secara perlahan mulai bergerak naik. Tekanan didalam silinder konstan selama proses karena didasarkan pada tekanan atmosfer dari luar dan berat dari torak.

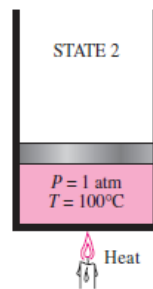


Gambar 7. Air pada fase cair tekan (*Compressed Liquid*)

(Cengel dan Boles, 2006)

### 2.9.2 Cair Jenuh (*Saturated Liquid*)

Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai 100°C. Pada titik ini air masih dalam fase cair, tetapi sedikit saja ada penambahan kalor maka sebagian air tersebut akan berubah menjadi uap. Kondisi ini disebut dengan cair jenuh seperti digambarkan pada Gambar 8.

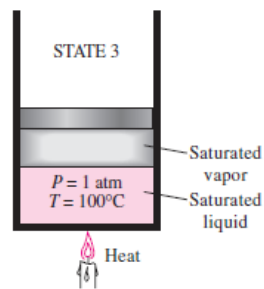


Gambar 8. Air pada fase cair jenuh

(Cengel dan Boles, 2006)

### 2.9.3 Campuran Air-Uap (*Liquid-Uap Mixture*)

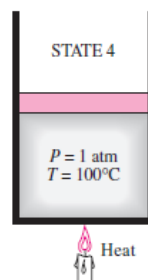
Saat pendidihan berlangsung, tidak terjadi kenaikan temperatur sampai cairan seluruhnya berubah menjadi uap. Temperatur akan tetap konstan selama proses perubahan fase jika temperatur juga dijaga konstan. Pada proses ini volume fluida didalam silinder meningkat karena perubahan fase yang terjadi, volume spesifik uap lebih besar dari pada cairan sehingga menyebabkan torak terdorong keatas. Untuk lebih jelasnya, campuran air-uap dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Campuran air dan uap  
(Cengel dan Boles, 2006)

#### 2.9.4 Uap Jenuh (*Saturated Uap*)

Jika kalor terus ditambahkan, maka proses pengauapan akan terus berlangsung sampai seluruh cairan berubah menjadi uap, seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi.

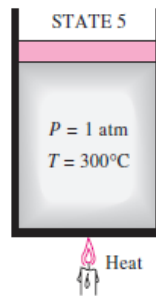


Gambar 10. Uap jenuh  
(Cengel dan Boles, 2006)

#### 2.9.5 Uap Panas Lanjut (*Superheated Uap*)

Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut karena temperatur uap didalam silinder diatas temperatur saturasi dari uap jenuh pada tekanan 1 atm yaitu 100<sup>0</sup>C (Cengel dan Boles, 2006).

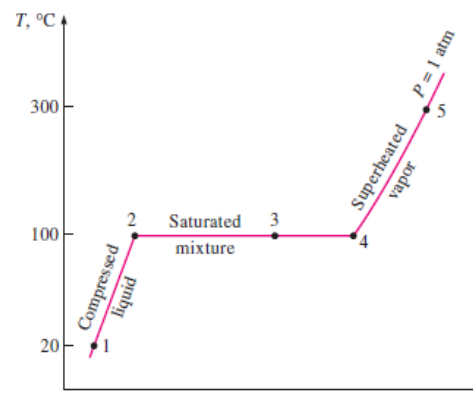




Gambar 11. Uap *Superheated*

(Cengel dan Boles, 2006)

Proses diatas digambarkan pada suatu diagram T-v seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram T-v pemanasan air pada tekanan konstan

(Cengel dan Boles, 2006)

## 2.10 Entalpi

Entalpi (H) suatu sistem adalah penjumlahan dari energy dalam (*internal energy*) dengan hasil kali tekanan dan volume sistem. Hukum kekekalan energy menjelaskan bahwa energy tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnah kan, tetapi hanya dapat diubah dari bentuk energi yang satu menjadi bentuk energi yang lain. Nilai suatu energi tidak dapat diukur, yang dapat diukur hanyalah perubahan energy ( $\Delta E$ ). Demikian juga halnya dengan entalpi. Entalpi tidak dapat diukur, kita hanya dapat mengukur perubahan entalpi ( $\Delta H$ ).

$$\Delta H = h_i - h_o$$

Dimana

H = Perubahan entalpi

$h_i$  = entalpi produk

$h_o$  = entalpi reaktan

bila  $H$  produk  $>$   $H$  reaktan, maka  $\Delta H$  bertanda positif, berarti ada penyerapan kalor dari lingkungan ke sistem

bila  $H$  produk  $<$   $H$  reaktan, maka  $\Delta H$  bertanda negatif, berarti terjadi pelepasan kalor ke lingkungan

Dalam proses pembangkit uap terjadi proses transformasi energy panas menjadi energy potensial uap (entalpi). Dengan prinsip ke samaan energy pada pembangkit uap, diperoleh rumusan yang menunjukkan hubungan daya dengan perubahan entalpi yaitu sebagai berikut.

$$p = m (h_o - h_i) \quad \text{atau} \quad m = p / (h_o - h_i) \dots\dots\dots (1)$$

keterangan :

$p$  = Daya , kW/jam

$m$  = laju produksi uap, Kg/jam

$h_o$  = entalpi yang dihasilkan pembangkit uap, KJ/kg

$h_i$  = entalpi air pada temperatur air masuk ke pembangkit uap, kj/kg

Pada kondisi tunak (steady state), laju produksi uap akan tepat sama dengan laju aliran uap yang lewat turbin. Pada kondisi transient laju produksi uap akan lebih besar dari laju aliran uap yang lewat turbin, sehingga diperlukan pengaturan katup yang kemudian berpengaruh pada perubahan besaran operasi.

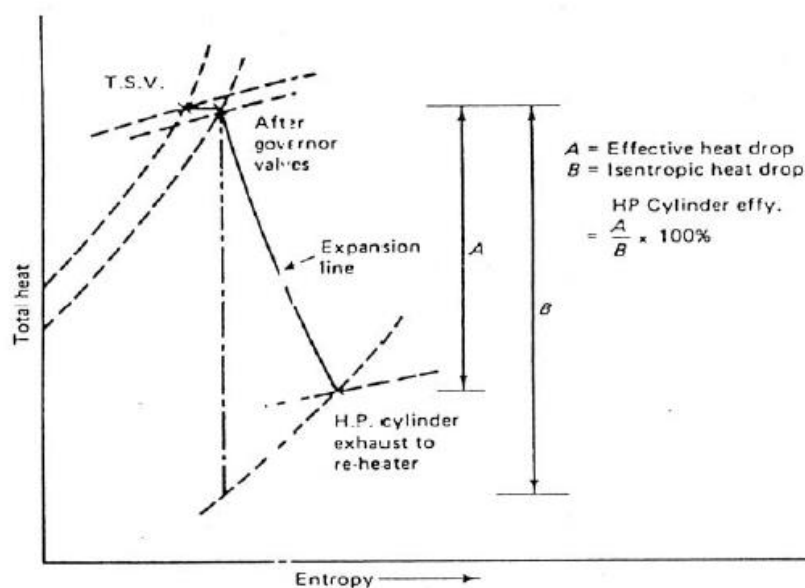
## 2.11 Efisiensi

Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output terhadap input dalam suatu proses. Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi atau proses transfer terjadi. (Cengle dan Boles, 2006)

PLTU dirancang untuk menghasilkan output berupa energi listrik dalam besaran tertentu untuk sejumlah input berupa bahan bakar dalam jumlah tertentu

pula. Bila seluruh komponen PLTU memiliki efisiensi yang tinggi, maka unjuk kerja (performance) PLTU tersebut dikatakan tinggi sehingga biaya operasi PLTU juga menjadi rendah. Seandainya karena suatu sebab unjuk kerja PLTU turun, berarti PLTU memerlukan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan output energi listrik sesuai desain. Akibatnya biaya operasi menjadi semakin tinggi.

Idealnya, kita menghendaki agar energi kimia (input) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (output). Pada kenyataannya, hal ini tidak mungkin dapat dilaksanakan karena adanya berbagai kerugian (*losses*) yang terjadi hampir disetiap komponen PLTU. Akibat kerugian-kerugian tersebut, maka energi listrik yang dihasilkan PLTU selalu lebih kecil dari energi kimia yang masuk ke sistem PLTU. Umumnya pada PLTU dihitung efisiensi termal, dalam konteks efisiensi termal maka output maupun input harus dinyatakan dalam besaran yang sama yaitu besaran panas.



Gambar 14 perbandingan ekspansi isentropi dengan aktual

([www.artikel-teknologi.com](http://www.artikel-teknologi.com))

Dari gambar 14 terlihat bahwa secara ideal panas yang masuk sebesar B tetapi terjadi ekspansi secara aktual sebesar A. Jadi bisa dikatakan efisiensi turbin secara umum adalah

$$\eta_T = A/B \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

### 2.12 Heat Rate

*Heat rate* didefinisikan sebagai banyaknya panas yang diperlukan untuk membangkitkan satu kwh listrik. *Heat rate* diperoleh dengan cara membagi konsumsi panas per jam dengan output energi listrik dalam satu jam. Karena itu *heat rate* dinyatakan dalam satuan KJ/Kwh, BTU/Kwh atau Kcal/Kwh.

Secara umum dikenal dua macam *heat rate* yaitu *Heat Rate Bruto (Gross)* dan *Heat Rate Netto*. Pada *heat rate bruto*, maka output energi listrik yang diukur adalah energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Sedangkan untuk *heat rate netto*, energi listrik yang diukur adalah energi listrik yang dihasilkan generator dikurangi energi listrik yang dipakai untuk menggerakkan alat-alat bantu PLTU (energi listrik yang membangkitkan generator - pemakaian sendiri).

Secara garis besar, terdapat korelasi antara *heat rate* dengan efisiensi termal dari suatu unit pembangkit. Semakin rendah *heat rate* maka efisiensi semakin baik, dengan kalimat lain dapat dinyatakan bahwa efisiensi termal berbanding terbalik terhadap *heat rate*. Persamaan umum *heat rate* adalah :

$$\text{Heat Rate} = \frac{\text{Panas masuk dari boiler}}{\text{Listrik keluar dari generator}} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

Hubungan dengan efisiensi termal

$$\eta_{th} = \frac{3600}{\text{Heat Raet}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

*Heat Rate* turbin akan naik jika dipengaruhi kerugian (*losses*) pada turbin. Kerugian tersebut seperti :

- **Kerugian pada perapat (labyrinth)**

Pada turbin tekanan tinggi, jika sistem perapat (*gland seal*) tidak baik maka uap akan melewati celah antara sudu tetap dan poros sehingga energi dari uap tidak semuanya diberikan pada turbin untuk melakukan kerja.

- **Kerugian karena derajat kebasahan uap.**

Pada turbin tekanan rendah temperatur uap mulai menurun, akibatnya uap pada daerah ini menjadi uap basah. Pada tingkat kebasahan tertentu kecepatan fraksi air akan lebih rendah dari sudu maka bukan air yang memutar sudu tetapi

sebaliknya. Karena hal tersebut maka akan terjadi erosi pada sudu selain itu juga terjadi kerugian mekanik karena fraksi uap menghambat kerja sudu turbin.

- **Kerugian *Throttling* pada beban partial.**

Pada saat beban *partial* atau mode *sequence* tidak semua katup governor membuka secara keseluruhan, ada yang membuka sebagian ada yang menutup (*throttling*). Hal ini merupakan kerugian karena pada proses *throttling* terjadi proses penurunan temperatur dan tekanan, akibatnya ekspansi pada turbin akan berkurang.

- **Kerugian mekanik.**

Besarnya kerugian gesekan yang terjadi pada bantalan tergantung pada kondisi sistem pelumasan. Faktor yang dominan dari sistem pelumasan baik dalam pembentuk lapisan pelumas (lapisan flim) maupun terhadap koefisien gesek adalah kekentalan (*viscosity*) minyak pelumas. Sedangkan kekentalan minyak pelumas merupakan fungsi dari temperatur. Bila kekentalan terlalu rendah maka pelumas film akan rusak yang pada akhirnya meningkatkan gesekan antara poros dengan bantalan. Bila kekentalan minyak pelumas terlalu tinggi maka koefisien gesek minyak pelumas akan bertambah besar sehingga pada akhirnya juga meningkatkan gesekan. Karena itu temperatur minyak pelumas merupakan parameter penting yang harus di perhatikan secara seksama oleh operator.

- **Kerugian pada jalur perpipaan**

Jalur pipa uap selalu diisolasi selain sebagai pengaman bagi operator juga untuk mencegah panas berpindah pada udara sekitar. Jika jalur ini bocor atau tidak terisolasi dengan baik maka akan terjadi kerugian panas karena panas uap berpindah ke lingkungan.