

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1.1** Cahyadi (2015) melakukan penelitian tentang analisa perhitungan efisiensi turbin dan generator QSFN – 300-2-20 B unit 10 dan 20 PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada Unit 10 nilai persentase efisiensi terendah terjadi yaitu sebesar 90.75%, sedangkan persentase nilai efisiensi tertinggi yaitu sebesar 95.93%. Jika dibandingkan dengan nilai efisiensi desain maka dapat diketahui bahwa turbin dan generator mengalami penurunan efisiensi yaitu dari  $\pm 98\%$  menjadi 93.15%

**2.1.2** Apri (2009) melakukan studi penelitian tentang Pengaruh Perubahan Beban Generator Listrik Terhadap Efisiensi Kinerja PLTU penelitian tersebut dilakukan di PT. Musim Mas dengan kapasitas pembangkit 10MW. Efisiensi pada PLTU tersebut relatif rendah dibandingkan dengan PLTU pada umumnya yaitu berkisar antara 20,26% - 21,61 %. Efisiensi tertinggi terjadi pada saat beban 7300 Kw yaitu sebesar 21,61% dan efisiensi terendah terjadi pada saat beban 5500 Kw yaitu sebesar 20,26%.

**2.1.3** Sudarto (1999) melakukan penelitian tentang Kajian Teoritik Perhitungan Efisiensi PLTU Unit I Kapasitas 400 MW di Paiton. Dari hasil studi analisa yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa PLTU Paiton Unit I efisiensi tertinggi yaitu pada saat beban 400 MW. Yaitu dengan persentase efisiensi pembangkitan sebesar 35,08%.

## **2.2 DASAR TEORI**

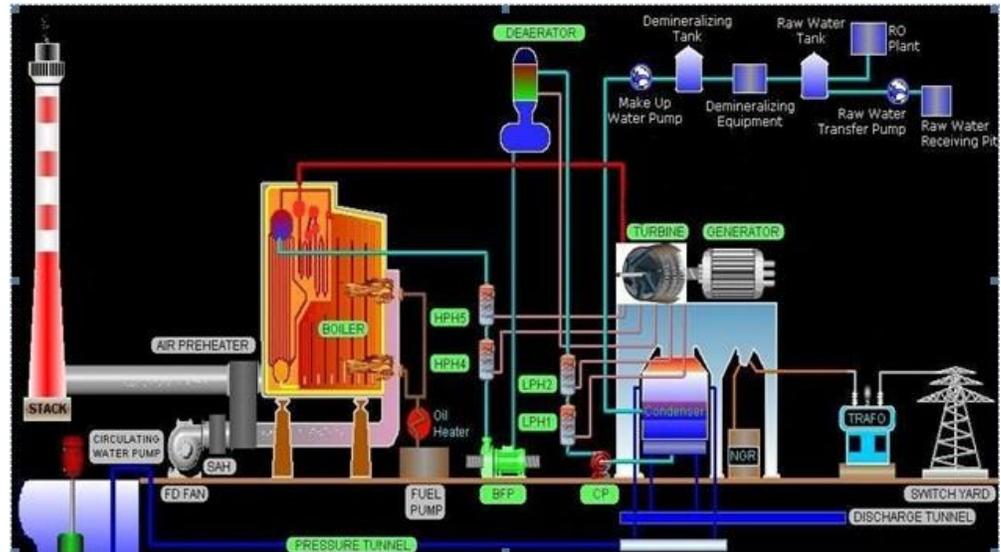
### **2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap ( PLTU)**

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah suatu pembangkit tenaga listrik yang menggunakan turbin uap sebagai penggerak mula-mula atau dengan kata lain menggunakan energi uap untuk memutar turbin. Sistem fluida pada PLTU yaitu menggunakan sistem kerja fluida yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat adalah sebagai berikut:

1. Langkah pertama yaitu mengisi air ke boiler hingga mengisi penuh seluruh permukaan pemindah panas. Di dalam boiler, air akan mendapatkan panas dengan menyerap gas panas hasil pembakaran bahan bakar batubara, HSD serta udara sehingga berubah menjadi uap untuk memutar turbin.
2. Kedua, uap yang dihasilkan dari boiler dengan tekanan dan

temperatur tertentu maka akan diarahkan untuk memutar turbin *HP* (*High Pressure*), *IP* (*intermediet Pressure*) dan *LP* (*Low Pressure*) sehingga menghasilkan energimekanik yang berupa putaran.

3. Generator akan dikopel langsung dengan turbin sehingga ketika turbin berputar maka akan menghasilkan energi listrik dari terminal output generator.
4. Uap yang telah terpakai untuk memutar turbin maka akan masuk ke kondensor untuk didinginkan kembali dengan menggunakan air laut yang di pompa menggunakan pompa *CWP* (*Circulation Water Pump*) agar berubah menjadi air melalui proses kondensasi. Air kondensat ini kemudian dipanaskan lagi secara bertahap menggunakan *heater*/pemanas menggunakan uap ekstraksi melalu *LPH1*, *LPH2*, *Daerator*, *HPH4* dan *HPH5*. Air *demin* tersebut digunakan kembali sebagai air pengisi boiler. Demikian siklus ini berlangsung secara terus-menerus dan berulang-ulang.



**Gambar 2.1** Kerja siklus tertutup fluida pada PLTU

### 2.2.2 Proses Pembakaran Batu Bara

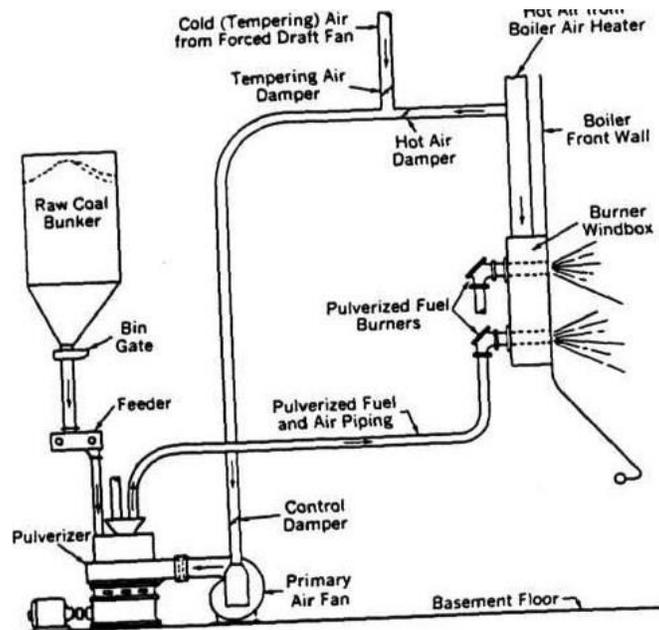
Proses pembakaran batu bara umumnya membutuhkan sebuah tempat penyimpanan dan peralatan penanganannya. Batu bara yang masih berbentuk bongkahan-bongkahan besar akan diperkecil dengan menggunakan mesin pemecah (*crusher*). Kemudian batu bara akan disimpan di tempat terbuka sampai diperlukan. *Belt conveyors* mengangkut batu bara dari tempat pembongkaran (*unloading*) menuju tempat pemecahan (*crusher house*), kemudian ditimbun di tempat penyimpanan yang selanjutnya diproses di tempat pembakaran.

Pada umumnya batu bara digiling menjadi serbuk ataupun butiran-butiran dengan diameter sesuai kebutuhan melalui mesin *pulverizer* dengan menggunakan *variable speed coal feeders controlled*

untuk merespon penambahan beban. Batu bara akan terbakar dengan mudah dan efisien seperti gas jika dibuat dalam bentuk serbuk atau diameter yang cukup kecil. Di samping itu jika digunakan dalam bentuk serbuk, batu bara akan mempunyai keuntungan-keuntungan antara lain dapat digunakan batu bara dengan segala macam ukuran, dapat melayani perubahan beban dengan baik, kebutuhan akan kelebihan udara pembakaran (*excess air*) rendah sehingga konsumsi daya untuk kipas lebih rendah, suhu pembakaran lebih tinggi, efisiensi termal lebih baik sehingga menghasilkan biaya operasi dan biaya pemeliharaan yang rendah.

Kemudian serbuk batu bara tersebut didorong oleh udara primer menggunakan bantuan *primary air fan* (PA fan) sampai ke ruang pembakaran pembakar (*burner*). Pembakar batu bara serbuk menerima serbuk batu bara kering dan udara primer kemudian mencampurnya dengan udara pembakaran utama dari *forced draft fan* (FD fan) sehingga dalam proses tersebut menghasilkan nyala api di dalam tanur.

Sistemnya dapat dilihat seperti pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Proses pembakaran batu bara pada PLTU

Dalam perhitungan neraca energi dan efisiensi perlu diketahui tentang nilai kalor dari proses pembakaran batu bara. Nilai kalor menunjukkan perpindahan panas dari suatu proses pembakaran batu bara yang didinginkan sampai suhu mula-mula dari udara dan batu bara.

### 2.2.3 Siklus Rankine

Siklus Rankine atau siklus tenaga uap merupakan siklus teoritis paling sederhana yang mempergunakan uap, dimana uap tersebut digunakan untuk memutar turbin. Sebagaimana dipergunakan pada sebuah pusat listrik tenaga uap. Pembangkit listrik tenaga uap yang terdiri atas komponen-komponen terpenting yaitu: Boiler, Turbin Uap, Kondensor dan Generator listrik.

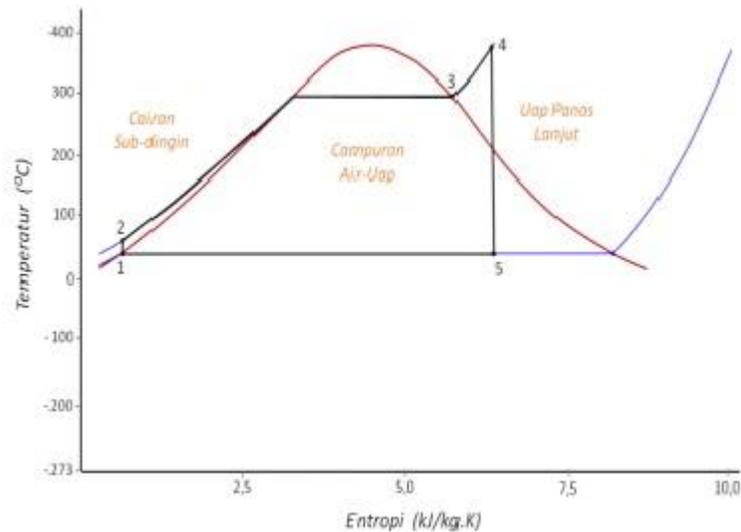
Jumlah energi masuk sebagai bahan bakar melalui boiler adalah  $E_m$ , sedangkan energi efektif yang tersedia pada poros turbin adalah energi kerja  $E_k$ . Energi yang terbuang melalui kondensor adalah sebesar  $E_b$ . Dengan menganggap semua kerugian lainnya adalah  $E_b$ , secara matematis dapat ditulis dengan rumus:

$$E_m = E_k + E_b$$

Sedangkan untuk efisiensi kerja dapat ditulis dengan rumus :

$$\eta = \frac{E_k}{E_m} = \frac{E_k - E_b}{E_m}$$

Siklus kerja PLTU yang merupakan siklus tertutup dapat digambarkan dengan diagram T - s (Temperatur – entropi). Siklus ini adalah penerapan siklus rankine ideal. Gambar 2.2 menunjukkan urutan kerja dari diagram T – s Siklus PLTU.



**Gambar 2.3** Diagram T–s Siklus PLTU (Siklus Rankine)

1. 1 - 2: Air dipompa dari tekanan P2 menjadi P1. Langkah ini adalah langkah *kompresi isentropis*, dan proses ini terjadi pada pompa air pengisi.
2. 2 - 3: Air bertekanan ini dinaikkan temperaturnya hingga mencapai titik didih dengan suhu tertentu. Terjadi di LP *heater*, HP *heater* dan *Economiser*. Dan air berubah wujud menjadi uap jenuh. Pada langkah ini disebut *vapourising* (penguapan) dengan proses *isobar isothermis*, terjadi di boiler yaitu di *wall tube (riser)* dan *steam drum*.
3. 3 - 4: Uap dipanaskan lebih lanjut hingga uap mencapai temperatur kerjanya menjadi uap panas lanjut (*superheated vapour*). Langkah ini terjadi di *superheater* boiler dengan proses *isobarik*.

4. 4 - 5: Uap melakukan kerja sehingga tekanan dan temperaturnya mengalami penurunan. Langkah ini adalah langkah *ekspansi isentropis*, Proses ini terjadi didalam turbin.
5. 5 - 1: Pembuangan panas laten uap sehingga berubah menjadi air kondensat. Langkah ini adalah *isobar isothermis*, Proses ini terjadi didalam kondensor.

#### **2.2.4 Komponen-Komponen Utama PLTU**

Struktur dan komponen-komponen utama sebuah pusat listrik tenaga uap (PLTU) dapat dilihat pada gambar 2.4. Sebuah boiler bekerja sebagai tungku memindahkan panas berasal dari bahan bakar kepada barisan pipa-pipa air yang mengelilingi api. Air harus senantiasa berada dalam keadaan mengalir walaupun dilakukan dengan menggunakan pompa.

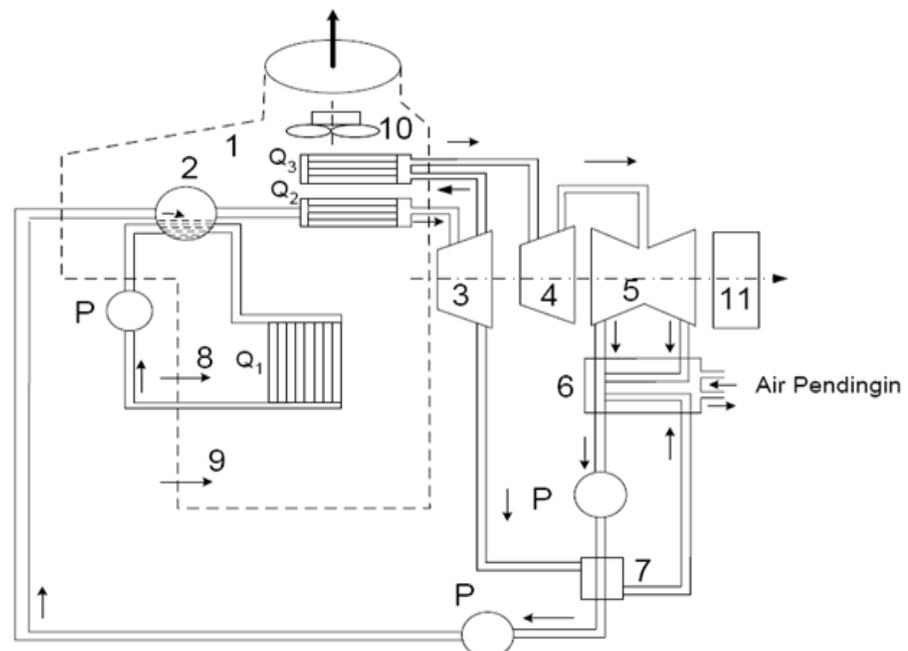
Air tersebut kemudian dipanaskan dengan menggunakan bahan bakar batu bara sehingga terbentuklah uap bertekanan dengan suhu temperatur yang tinggi, dimana uap tersebut kemudian mengalir ke turbin bertekanan tinggi setelah melewati superheater guna meningkatkan suhu uap sampai dengan kira-kira  $500^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ . Dengan demikian uap juga menjadi kering dan efisiensi seluruh PLTU meningkat.

Turbin tekanan tinggi merubah energi termal menjadi energi

mekanik dengan mengembangkannya uap yang melewati sudu-sudu turbin. Dimana dalam hal ini uap mengalami penurunan nilai tekanan dan nilai temperatur. Agar meningkatkan efisiensi termal dan menghindari terjadinya kondensasi terlalu dini, maka uap dilewatkan menuju sebuah pemanasan ulang yang juga terdiri atas barisan-barisan pipa-pipa yang dipanaskan.

Uap telah yang meninggalkan pemanas ulang maka dialirkan ke turbin tekanan menengah. Turbin tekanan menengah memiliki ukuran yang lebih besar dari pada turbin tekanan tinggi, karena dengan menurunnya nilai tekanan uap, maka volume menjadi naik. Kemudian uap dialirkan menuju turbin bertekanan rendah, yang memiliki ukuran yang lebih besar. Setelah itu uap dialirkan menuju kondensor. Dimana uap yang telah memasuki kondensor maka akan didinginkan menggunakan air pendingin, sehingga terjadilah kondensasi. Air pendingin biasanya berasal dari laut, sungai atau danau terdekat. Proses kondensasi uap menyebabkan terjadinya pakem yang diperlukan guna meningkatkan efisiensi turbin. Air hangat yang meninggalkan kondensor dipompakan ke sebuah pemanas awal sebelum dikembalikan ke drum boiler. Pemanas awal memperoleh energi termal dari uap yang diambil dari turbin bertekanan tinggi. Menurut beberapa studi yang dilakukan, hal demikian meningkatkan efisiensi keseluruhan PLTU.

Selain memiliki komponen-komponen utama yang telah disebutkan diatas, sebuah PLTU masih memiliki ratusan lagi komponen dan alat-alat lain guna menjalankan seluruh sistem, seperti katup uap, pembersih air, pompa minyak pelumas, dan lain sebagainya. Sebuah PLTU batu bara juga perlu memiliki sebuah fasilitas untuk penerimaan batu bara dari kereta api atau dari laut/sungai serta sebuah halaman batu bara dengan fasilitas penggilingan. Banyak PLTU batu bara juga dilengkapi dengan fasilitas untuk memanfaatkan abu terbangnya guna dibuat batu bata untuk bangunan atau jalanan. Dan tidak kalah penting perlu adanya fasilitas untuk mengurangi pencemaran. Agar partikel-partikel tidak dibuang ke udara melalui cerobong, digunakan electro statik presipitator. Dan untuk mengurangi emisi belerang digunakan peralatan desulfurisasi gas buang (*fluegas desulfurization*, FGD). Sulfur sering terdapat pada batu bara. Untuk mengurangi masalah ini dikembangkan apa yang dinamakan teknologi batu bara bersih (*clean coal technology*).



**Gambar 2.4** Komponen-komponen utama PLTU

Keterangan gambar:

- |                             |                |                 |
|-----------------------------|----------------|-----------------|
| 1 : Boiler                  | P              | : Pompa         |
| 2 : Drum                    | Q <sub>1</sub> | : Pipa-pipa     |
| 3 : Turbin Tekanan Tinggi   | Q <sub>2</sub> | : Superhiter    |
| 4 : Turbin Tekanan Menengah | Q <sub>3</sub> | : Pemanas Ulang |
| 5 : Turbin Tekanan Rendah   |                |                 |
| 6 : Kondensor               |                |                 |
| 7 : Pemanasan Awal          |                |                 |
| 8 : Pembakaran Bahan Bakar  |                |                 |
| 9 : Kipas Udara Masuk       |                |                 |
| 10: Kipas Gas Buang         |                |                 |
| 11: Generator               |                |                 |

### 2.2.5 Boiler

Boiler adalah sebuah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau uap (*steam*) dengan suhu dan tekanan tertentu. Air panas atau steam pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Air adalah media yang berguna dan murah untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Jika air dipanaskan hingga mencapai titik didih tertentu maka secara otomatis air tersebut akan memiliki nilai tekanan yang tinggi, sehingga volumenya akan meningkat sekitar 1.600 kali, dan menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga boiler merupakan peralatan yang harus dikelola dengan ketelitian yang sangat baik.

Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sebuah jalur pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar 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 tersebut.

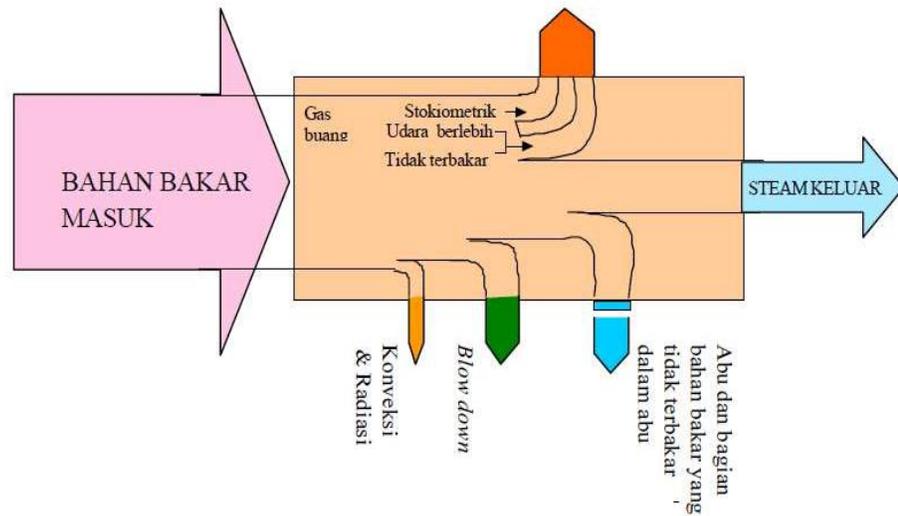
Air yang disuplai ke boiler untuk dirubah menjadi steam disebut air umpan. Dua sumber air umpan adalah: (1) Kondensat atau steam yang mengembun yang kembali dari proses dan (2) *Air makeup* yaitu air baku yang sudah diolah yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses. Untuk mendapatkan nilai efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan *economizer* untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang.

Secara umumnya ketel uap diperlukan pada beberapa industri/perusahaan yang memerlukan pemanasan di dalam produksinya atau menggunakan tenaga uap untuk menjalankan mesin-mesinya. Pada rumah-rumah sakit ketel uap digunakan untuk memasak, memanasi suatu bejana, tempat pencucian dan digunakan untuk penggerak mesin-mesin yang harus berputar cepat (turbin uap) dan suatu mesin yang memerlukan suatu tenaga dorong yang sangat kuat.

Parameter kinerja boiler, seperti efisiensi dan rasio penguapan, berkurang terhadap waktu disebabkan penurunan efisiensi pembakaran, kotoranya permukaan penukar panas dan

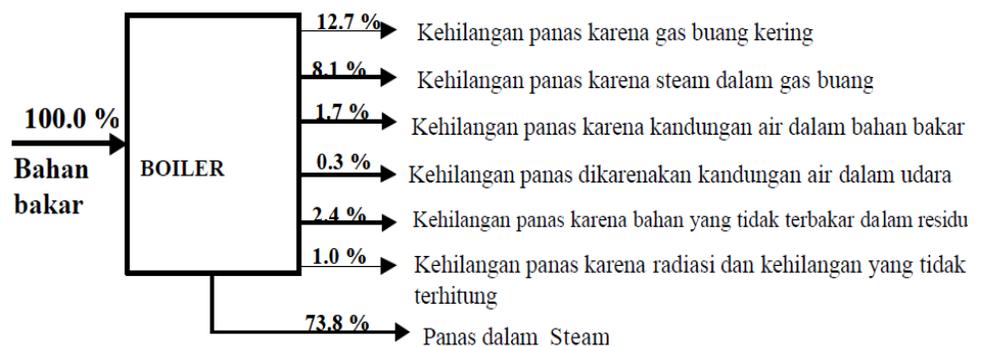
buruknya operasi serta pemeliharaan yang kurang baik. Bahkan untuk boiler yang baru sekalipun, alasan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas air dapat mempengaruhi penurunan sistem kinerja boiler. Neraca panas dapat membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Uji efisiensi boiler dapat membantu dalam menemukan penyimpangan efisiensi boiler dari efisiensi terbaik dan target area permasalahan untuk tindakan perbaikan.

Proses pembakaran dalam boiler dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi. Diagram ini menggambarkan secara grafis tentang bagaimana energi masuk dari bahan bakar diubah menjadi aliran energi dengan berbagai kegunaan dan menjadi aliran kehilangan panas dan energi. Panah tebal menunjukkan jumlah energi yang dikandung dalam aliran masing-masing.

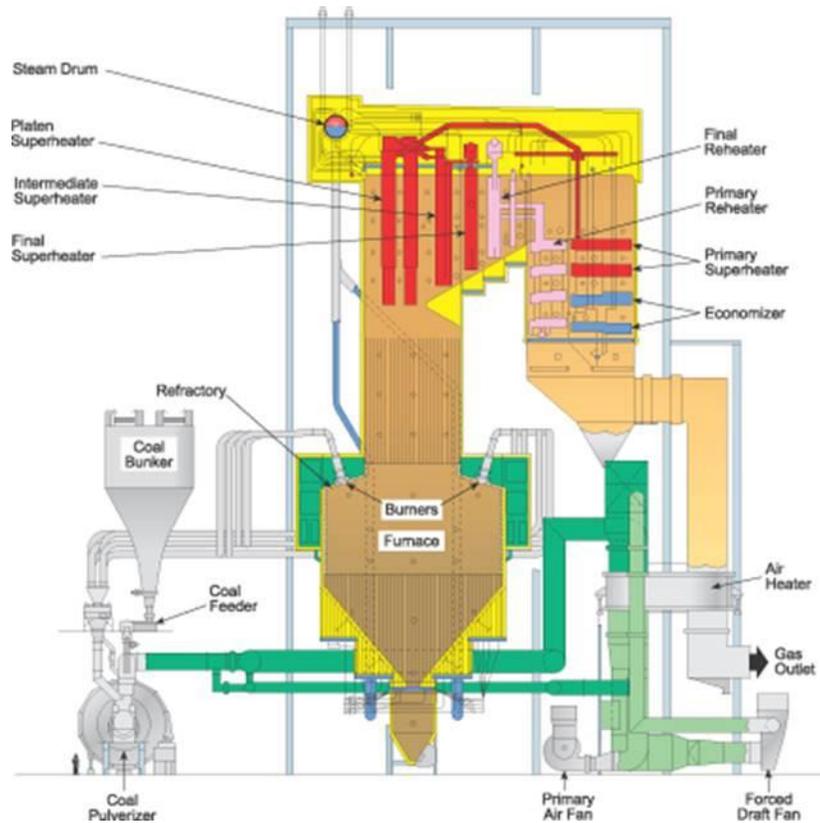


**Gambar 2.5** Diagram neraca energi boiler

Neraca panas merupakan sebuah keseimbangan energi total yang masuk boiler terhadap yang meninggalkan boiler dalam bentuk yang berbeda. Gambar berikut memberikan gambaran tentang bagaimana kehilangan energi saat pembangkitan steam.



**Gambar 2.6** Kehilangan panas pada boiler yang berbahan bakar batubara



**Gambar 2.7** Gambar sistem kerja boiler

### 2.2.6 Turbin Uap

Turbin uap berfungsi untuk mengkonversi energi panas yang dikandung oleh uap menjadi energi putar (energi mekanik). Poros turbin dikopel dengan poros generator sehingga ketika turbin berputar maka generator secara langsung juga ikut berputar.

Uap yang telah melakukan kerja di turbin tekanan dan temperatur turun hingga kondisinya menjadi uap basah. Uap keluar turbin ini kemudian dialirkan kedalam kondensor untuk didinginkan kembali agar menjadi air kondensat, sedangkan energi mekanik yang

dihasilkan digunakan untuk memutar generator. Berikut adalah jenis-jenis turbin uap:

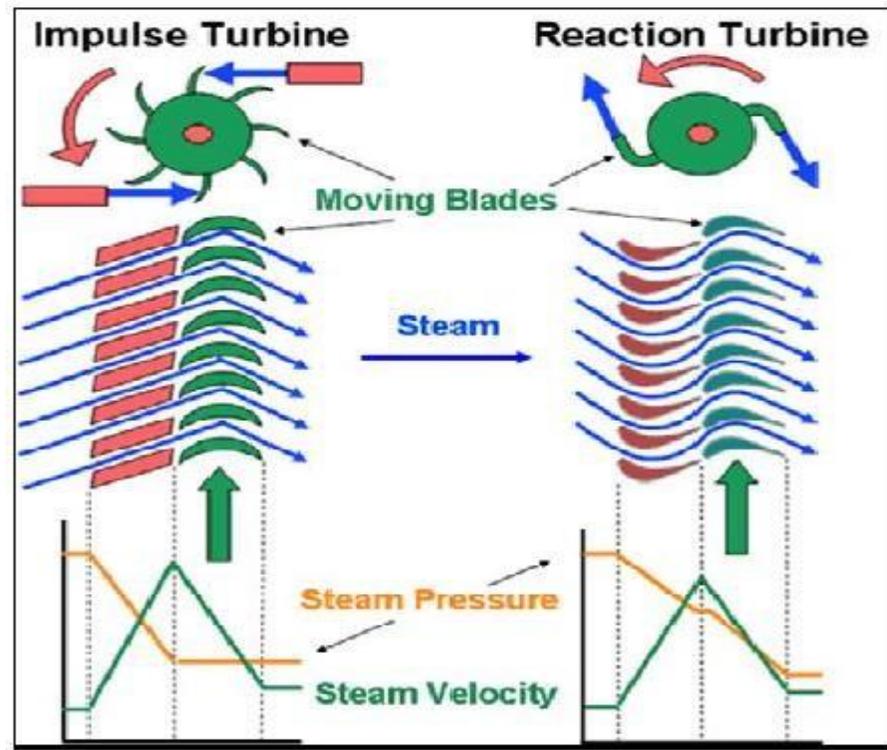
1. Turbin *Impuls* (Aksi)

Turbin impuls atau turbin isobarik adalah turbin yang ekspansi uapnya hanya terjadi pada sudu-sudu tetap atau nosel. Ketika sebuah uap melewati sudu tetap, maka nilai tekanan akan turun dan uap mengalami peningkatan energi kinetik. Sudu-sudu tetap berfungsi sebagai nosel (saluran pancar) dan mengarahkan aliran uap ke sudu-sudu gerak.

2. Turbin Reaksi

Pada turbin reaksi penurunan tekanan terjadi pada sudu tetap dan sudu gerak. Sistem kerja dari kedua turbin ini mempunyai karakteristik yang berbeda seperti ditunjukkan dalam gambar dibawah.

Gambar 2.8 dibawah ini menunjukkan jenis turbin uap dan karakteristiknya.

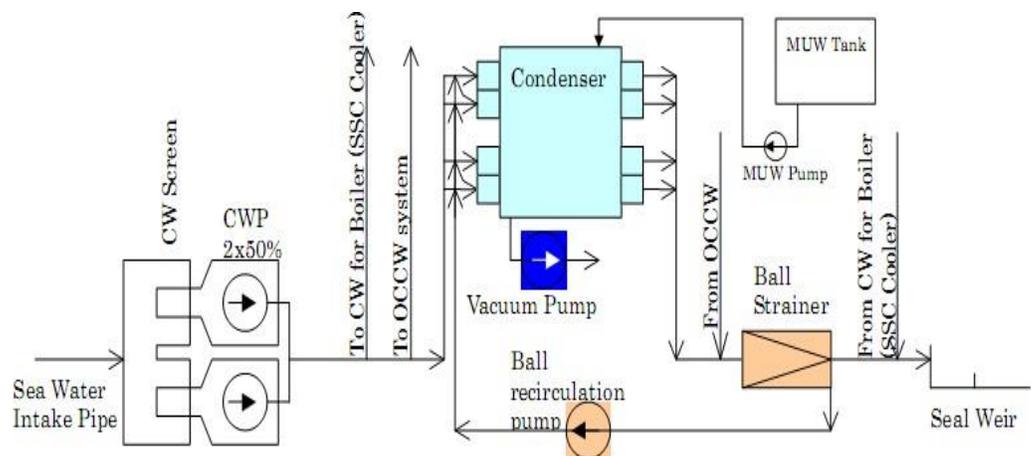


**Gambar 2.8** Jenis turbin dan karakteristiknya

### 2.2.7 Kondensor

Kondensor merupakan sebuah peralatan yang digunakan untuk mengembunkan kembali uap yang telah dimanfaatkan untuk memutar turbin uap. Hal ini dilakukan untuk menghemat sumber air yang ada di sekitarnya serta menjamin kondisi kemurnian air yang digunakan dalam sistem turbin uap agar tidak terjadi pengendapan maupun kotoran-kotoran yang dapat merusak. Sistem pendingin kondensor biasanya menggunakan air dingin seperti air sungai, laut atau air tanah yang telah diproses terlebih dahulu melalui water treatment.

Fungsi utama kondensor adalah untuk mengkondensasikan uap *exhaust* dan menghilangkan kalor laten dari turbin tekanan rendah dengan nilai temperatur  $57,24^{\circ}\text{C}$ , suhu pada uap tersebut ditransfer ke air pendingin dengan temperatur  $29,40^{\circ}\text{C}$  yang dipompakan oleh pompa air pendingin dari bak penampungan air menuju ke kondensor, air pendingin ini dilewatkan melalui media tabung kondensor. Hasil dari proses kondensasi tersebut memiliki temperatur  $42,79^{\circ}\text{C}$ , yang kemudian digunakan sebagai penyedia air umpan untuk boiler. Fungsi kedua dari kondensor adalah untuk memisahkan air dengan uap dari *tube* sehingga temperaturnya mendekati temperatur suhu kamar.



**Gambar 2.9** Diagram alir kondensor

### 2.2.8 Generator Listrik

Generator AC yang akan dibahas adalah generator yang termasuk jenis mesin serempak (mesin sinkron) dimana frekwensi listrik yang dihasilkan sebanding dengan jumlah kutup dan putaran yang dimilikinya. Arus listrik yang dihasilkan adalah arus listrik bolak balik (listrik AC). Mesin penggerak (*prime mover*) nya dapat berasal dari tenaga uap, tenaga air, mesin diesel dan sebagainya.

Generator AC banyak kita jumpai pada pusat-pusat listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD, PLTN, PLTG, dan lain lain. Pada umumnya generator AC disebut dengan alternator atau generator saja. Selain generator AC dengan kapasitas yang relatif besar tersebut, terdapat juga jenis generator dengan kapasitas yang relatif kecil. Misalnya generator yang dipakai untuk penerangan darurat, untuk penerangan daerah-daerah terpencil (yang belum terjangkau PLN), dan sebagainya. Generator tersebut sering disebut dengan istilah home light atau generator set.

Bagian-bagian terpenting dari generator AC adalah:

1. Rangka stator, rangka stator dibuat dari besi tuang. Rangka stator merupakan rumah dari bagian-bagian generator .
2. Stator, bagian ini tersusun dari sebuah plat-plat (seperti yang digunakan juga pada jangkar dari mesin-mesin arus searah) stator yang mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan

lilitan stator. Lilitan pada stator berfungsi sebagai tempat terjadinya GGL induksi.

3. Rotor, rotor adalah bagian yang berputar. Pada rotor terdapat kutub utara dan kutub selatan magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah, melewati cincin geser dan sikat-sikat.
4. Slip ring, terbuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. Slip ring ini berputar bersama-sama dengan poros rotor. Jumlah slip ring ada dua buah yang masing-masing slip ring dapat menggeser sikat arang yang masing-masing merupakan sikat positif dan sikat negatif, berfungsi untuk mengalirkan arus penguat magnet ke lilitan magnet pada rotor.
5. Generator penguat, generator penguat adalah sebuah generator arus searah yang dipakai sebagai sumber arus. Biasanya yang dipakai adalah dinamo shunt. Generator arus searah ini pada umumnya dikopel terhadap mesin pemutarnya Bersama dengan generator utama. Akan tetapi saat ini banyak generator yang tidak menggunakan generator arus searah (dari luar) sebagai sumber penguat, sumber penguat diambil dari GGL sebagian kecil belitan statornya. GGL tersebut ditransformasikan kemudian disearahkan dengan penyearah elektronik sebelum masuk pada bagian penguat.

Generator generator sinkron umumnya dibuat sedemikian rupa sehingga lilitan tempat terjadinya GGL tidak bergerak, sedangkan kutub-kutub akan menimbulkan medan magnet berputar. Generator semacam ini disebut generator kutub dalam. Keuntungan dari generator kutub dalam ialah untuk mengambil arus listrik tidak dibutuhkan cincin geser dan sikat arang. Hal tersebut disebabkan karena lilitan-lilitan tempat terjadinya GGL itu tidak berputar. Genertor sinkron tersebut sangat cocok digunakan untuk mesin-mesin dengan tegangan yang tinggi dan arus yang lebih besar.

Secara umum kutub magnet mesin sinkron dibedakan atas:

1. Kutub magnet dengan bagian kutub yang menonjol (salient pole).  
Konstruksi seperti ini digunakan pada saat kondisi putaran rendah, dengan jumlah kutub yang banyak.
2. Kutub magnet dengan bagian kutub yang tidak menonjol (non salient pole).Konstruksi seperti ini digunakan pada saat kondisi putaran tinggi, dengan jumlah kutub yang sedikit. Kira-kira  $\frac{2}{3}$  dari seluruh permukaan rotor dibuat alur-alur untuk tempat lilitan penguat. Yang  $\frac{1}{3}$  bagian lagi merupakan bagian yang utuh, yang berfungsi sebagai inti kutub.

Secara matematis GGL induksi dapat dituliskan dengan rumus:

$$E = 4.44 \times f \times \phi \times N$$

Keterangan:

- E : GGL induksi (Volt)  
 F : Frekwensi listrik (Hz)  
 $\Phi$  : Besarnya fluk maghnet (Weber)  
 N : Jumlah lilitan  
 Z : Jumlah sisi lilitan

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

Keterangan:

- f : Frekwensi listrik ( Hz)  
 p : Banyaknya kutub maghnet  
 n : Putaran generator permenit

Jadi jika nilai f dimasukkan pada persamaan diatas maka diperoleh :

$$E = \frac{4.44 \times p \times n \times \phi \times N}{120}$$

Karena nilai  $p$  dan  $N$  sudah menjadi ketetapan pada generator maka harga-harga yang tidak berubah akan dijadikan menjadi suatu ketetapan yang sering kita sebut dengan Konstanta (K) sehingga persamaan lebih mudah untuk dipahami.

Pada umumnya penyediaan energi listrik terdiri atas sistem tiga fase, dan terdapat tiga pasangan elektromagnet yang terpisah serta tiga set kumparan yang juga terpisah. Antara masing-masing fase terdapat selisih 120 derajat listrik antara arus ketiga fase. Ketiga fase itu biasanya ditandai u-v-w, atau juga r-s-t, atau sering disebut pula dengan istilah hubungan delta atau hubungan bintang. Tegangan antara dua fase adalah  $V$ . Khusus pada hubungan bintang, terdapat titik bintang, yang diberi tanda 0. Tegangan antara fase dan titik bintang adalah  $V/\sqrt{3}$ . Dimana daya sebuah generator 3 phasa dinyatakan dalam rumus:

$$P = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \times \cos\phi$$

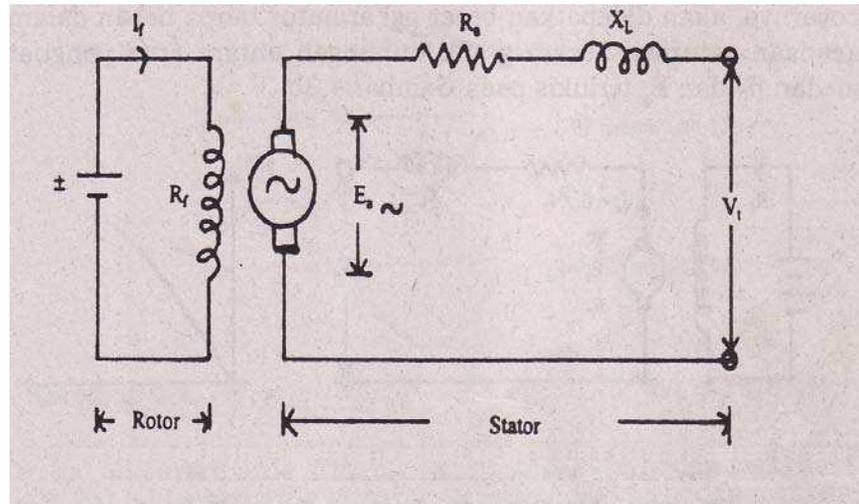
Keterangan:

P : daya (W)

$V_{L-L}$  : tegangan phasa-phasis (V)

I : arus beban (A)

$\cos\phi$  : faktor daya

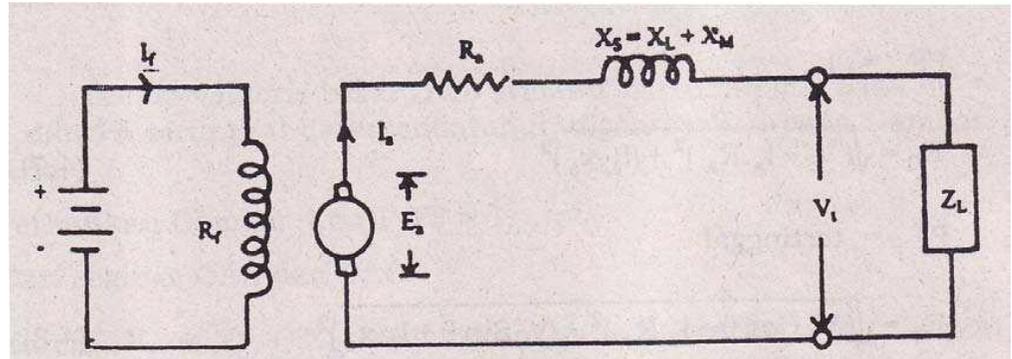


**Gambar 2.10** Rangkaian listrik generator tanpa beban

Keterangan:

- $I_f$  : arus kumparan medan atau arus penguat
- $R_f$  : hambatan kumparan medan
- $R_a$  : hambatan armatur
- $X_L$  : reaktansi bocor
- $V_t$  : tegangan output/terminal
- $E_a$  : gaya gerak listrik armature

Pada generator sinkron saat keadaan tanpa beban menandung arti bahwa arus armature ( $I_a$ ) = 0. Dengan demikian besar tegangan terminal adalah  $V_t = E_a = E_o$



**Gambar 2.11** Gambar generator saat pembebanan

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul  $I_a$  dan  $X_m$  akibatnya timbul penurunan GGL armatur tanpa beban. Tegangan terminal  $V_t$  yang timbul adalah:

$$V_t = E_a - I (R_a + j X_s)$$

$$V_t = E_a - I_a Z_s$$

Daya nominal sebuah generator biasanya dinyatakan dalam bentuk kW, atau MW, ataupun dalam kVA atau MVA. Dimana daya nominal ditentukan oleh suhu kerja dari kumparan, sedangkan faktor daya biasanya adalah 0,8. Efisiensi sebuah generator dinyatakan dalam rasio keluaran dibagi masukan. Keluaran yang bermanfaat merupakan seluruh masukan dikurangi rugi-rugi. Jenis rugi-rugi dibedakan menjadi dua yaitu: mekanikal dan elektrikal. Rugi-rugi mekanikal termasuk gesekan bantalan dan udara, sedangkan rugi-rugi elektrikal terdiri atas rugi-rugi besi dan tembaga. Semua rugi-rugi yang

dihasilkan maka akan mengakibatkan terjadinya panas yang harus dihilangkan melalui pendinginan.