

BAB II

PRINSIP KERJA PLTU

2.1. PROSES KONVERSI ENERGI

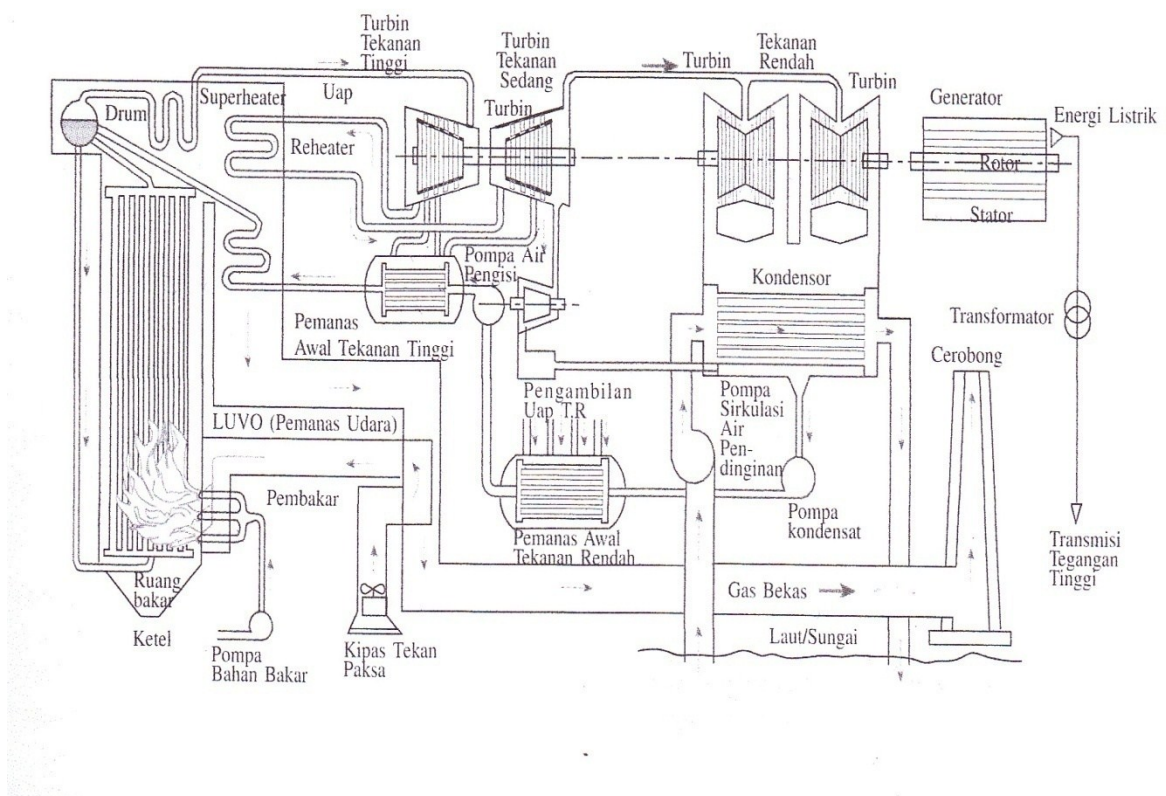
PLTU pada umumnya merupakan unit pembangkit yang terbesar dalam sistem karena secara teknis ukuran kapasitasnya juga yang paling besar. Hal ini menyebabkan bahwa dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik kendala yang dihadapi di PLTU perlu mendapat perhatian khusus. Secara teknis PLTU banyak sekali kendala operasinya, hal ini disebabkan karena proses konversi energi yang terjadi di PLTU cukup panjang dan tiap bagian pada jalur proses perubahan energi ini tidak sampai kemampuannya untuk menghadapi perubahan beban.

Dalam PLTU, energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), atau gas. Ada kalanya PLTU menggunakan kombinasi beberapa macam bahan bakar.

Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi primer menjadi energi panas (kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam pipa kecil untuk menghasilkan uap. Dalam turbin uap, energi (enthalpy) uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan

akhirnya energi mekanik dari turbin uap ini dikonversikan menjadi energi listrik dari generator.

Dalam proses produksi uap, sistem pembakaran berfungsi untuk mengendalikan secara efisien konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas yang kemudian dipindahkan melalui permukaan penyerap panas ke air/uap. Diperlukan suplai oksigen yang cukup agar pembakaran sempurna. Bila pembakaran tidak sempurna didalam flue gas akan ditemukan carbon monoxide (CO), methan (CH₄), hydrogen (H₂), dan lain-lain. Untuk menjamin agar terjadi pembakaran sempurna diperlukan oksigen sedikit lebih besar dari kebutuhan secara teoritis.



Gambar 2.1 *Prinsip Kerja PLTU*

2.1.1 PROSES KONVERSI ENERGI BAHAN BAKAR MENJADI ENERGI KALOR

Batubara merupakan bahan bakar utama PLTU. Batubara diangkut dengan belt conveyor menuju boiler house dan disimpan di dalam *coal silo*.

Untuk menghasilkan pembakaran yang efisien, batubara yang masuk ruang pembakaran harus digiling terlebih dahulu hingga berbentuk serbuk. Penggilingan batubara menjadi serbuk dilakukan *pulverizer* yang dikenal juga dengan nama *mill*. Pemasukan batubara dari coal silo ke pulverizer diatur dengan *coal feeder*, sehingga jumlah batubara yang masuk ke pulverizer dapat diatur dari kontrol room. Batubara yang sudah digiling menjadi serbuk ditiup dengan udara panas (*primary air fan*) dari pulverizer menuju *combustion burner (furnace)* melalui pipa-pipa (*coal piping*).

Pada saat start up, pembakaran tidak langsung dilakukan dengan batubara, tetapi mempergunakan bahan bakar minyak. Baru setelah beban mencapai $\pm 10 - 20\%$ batubara pelan-pelan mulai masuk menggantikan minyak. Karena pada saat start, suhu ruang bakar relatif rendah, jauh dari titik nyala batubara sehingga diperlukan pembakaran awal dengan bantuan Bahan Bakar Minyak (*BBM*). Bahan Bakar Minyak (*BBM*) relatif lebih mudah terbakar (menyala) dibandingkan batubara pada suhu rendah.

Serbuk batubara pada mill (pulverizer) dihembus dengan udara panas dari *Primary Air Fan (PAF)* untuk dipanaskan dan ditransfer lewat *Coal Pipe* dengan

kecepatan tertentu ke ruang bakar (*Coal Burner*). Agar pembakaran dalam furnace berlangsung dengan baik perlu didukung dengan sistem suplai udara dan sistem pembuangan gas sisa pembakaran yang baik. Tugas ini dilakukan oleh Air and Flue Gas System. Udara yang akan disuplai ke ruang pembakaran dipanaskan terlebih dahulu agar tercapai efisiensi pembakaran yang baik. Dalam ruang bakar serbuk yang sudah panas tersebut bercampur dengan udara dari *Forced Draft Fan (FDF)* yang berfungsi untuk menghasilkan secondary air untuk mensuplai udara ke ruang bakar. Udara dari Forced Draft Fan (FDF) sebelumnya dipanaskan dalam pemanas udara atau *Air Heater*. Pemanasan tersebut dilakukan oleh *Air Heater* dengan cara konduksi dengan memanfaatkan panas dari gas buang sisa pembakaran di dalam furnace. Proses ini akan menghasilkan pembakaran yang sempurna di ruang bakar.

Bahan bakar yang dicampur udara ini dinyalakan dalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran dalam ruang bakar. Pembakaran dalam ruang bakar mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas (kalori). Energi panas hasil pembakaran ini dipindahkan ke air yang ada dalam pipa air ketel melalui 3 proses perpindahan panas, yaitu:

a. Konduksi.

Proses perpindahan panas secara merambat pada suatu zat atau dari satu zat ke zat lain yang bersinggungan disebut 'konduksi'. Pemanasan pada dinding pipa saluran uap, sudu-sudu turbin uap, casing turbin adalah contoh perpindahan panas secara konduksi. Perpindahan panas secara konduksi hanya terjadi pada benda padat.

b. Konveksi.

Konveksi adalah perpindahan panas dalam suatu zat yang disebabkan oleh gerakan molekul-molekul dari zat tersebut karena itu konveksi hanya dapat terjadi pada zat cair dan gas.

Ada dua jenis konveksi, yaitu *konveksi alamiah* dan *konveksi paksa*. Pada *konveksi alamiah* perpindahan panas yang dilakukan oleh pergerakan fluida akibat perbedaan massa jenis. Dalam *konveksi paksa* fluida yang telah dipanasi langsung diarahkan ke tujuannya oleh sebuah peniup (blower) atau pompa.

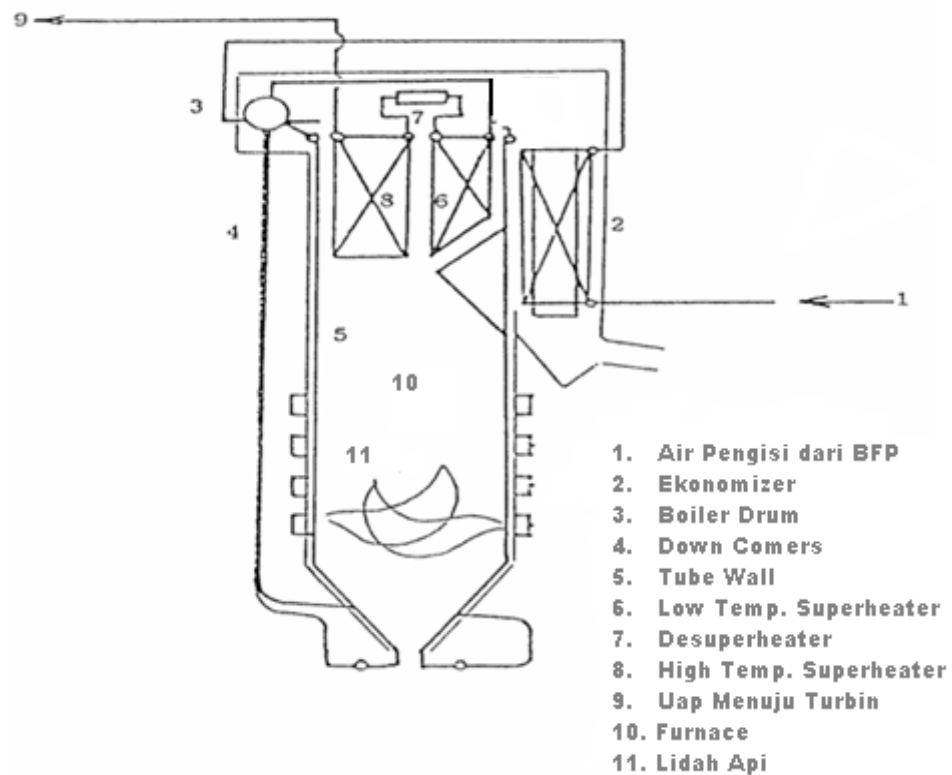
c. Radiasi.

Radiasi adalah proses perpindahan panas melintasi ruang melalui pancaran gelombang elektromagnetik dengan kecepatan cahaya dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur rendah. Perpindahan panas secara radiasi dapat terjadi meskipun tanpa perantara sehingga panas tetap dapat berpindah secara radiasi meskipun harus melintasi ruang hampa. Contoh adalah proses perpindahan panas yang terjadi di dalam ruang bakar (*furnace*) ketel ketika panas dari nyala api dipancarkan ke dinding ruang bakar (*wall tube*).

Hasil proses pembakaran yang terjadi menghasilkan limbah berupa abu. Sebagian abu yang berat jatuh ke bagian bawah boiler dan ditampung pada SSC (submerged scrapper Conveyor). Kemudian abunya ditransfer menggunakan Belt Conveyor (Ban Berjalan) dan dikirim ke Ash Valley. Gas hasil pembakaran dihisap keluar dari boiler oleh *Induced Draft Fan (IDF)* dan dilewatkan melalui *Electric*

Precipitator (EP) yaitu penangkap debu dan abu terbang sisa hasil pembakaran dengan efisiensi mencapai 99,5%. Kemudian sisa pembakaran dihembuskan ke cerobong (stack) setinggi ± 200 m yang bertujuan agar kandungan debu dan sisa hasil pembakaran masih di bawah ambang batas.

2.1.2 PROSES KONVERSI ENERGI KALOR MENJADI ENTHALPY



Gambar 2.2 Sirkulasi Air dan Uap di Boiler

Gas buang sisa pembakaran masih mengandung banyak energi panas karena tidak semua energi panasnya dapat dipindahkan ke air yang ada dalam pipa air ketel. Gas buang yang masih mempunyai suhu di atas 400°C ini dimanfaatkan untuk memanasi :

a. Pemanas Lanjut (Super Heater)

Di dalam pemanas lanjut, mengalir uap dari drum ketel yang menuju ke turbin uap tekanan tinggi. Uap yang mengalir dalam pemanas lanjut ini mengalami kenaikan suhu sehingga uap air ini semakin kering, oleh karena adanya gas buang di sekeliling pemanas lanjut. Suhu uap yang menuju turbin juga harus di kontrol tidak boleh terlalu tinggi. Apabila suhu uap yang menuju turbin $\geq 530^{\circ}\text{C}$ maka akan mengakibatkan silk turbin rusak. Untuk itu suhu uap yang melewati turbin dikontrol dengan menyemprotkan air ke superheater agar suhu uap tidak terlalu besar atau melewati batas yang ditentukan.

b. Pemanas Ulang (Reheater)

Uap yang telah digunakan untuk menggerakan turbin tekanan tinggi, sebelum menuju turbin tekanan menengah, dialirkan kembali melalui pipa yang dikelilingi oleh gas buang. Di sini uap akan mengalami kenaikan suhu yang serupa dengan pemanas lanjut.

c. Ekonomizer

Ekonomizer berfungsi untuk meningkatkan temperature air . Air yang dipompakan ke dalam ketel, terlebih dahulu dialirkan melalui ekonomizer agar mendapatkan pemanasan oleh gas buang. Dengan demikian suhu air akan lebih tinggi ketika masuk ke pipa air didalam ruang bakar yang

selanjutnya akan mengurangi jumlah kalor yang diperlukan untuk penguapan.

d. Pemanas Udara

Udara yang akan dialirkan ke ruang pembakaran yang digunakan untuk membakar bahan bakar, terlebih dahulu udara tersebut dialirkan melalui pemanas udara agar mendapat pemanasan oleh gas buang sehingga suhu udara pembakaran naik yang selanjutnya akan mempertinggi suhu nyala pembakaran.

Dengan menempatkan alat-alat tersebut di atas dalam saluran gas buang, maka energi panas yang masih terkandung dalam gas buang dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin. Sebelum melalui pemanas udara, gas buang diharapkan masih mempunyai suhu di atas suhu pengembunan asam sulfat H_2SO_4 , yaitu sekitar 180°C . Hal ini diperlukan untuk menghindari terjadinya pengembunan asam sulfat di pemanas udara. Apabila hal ini terjadi, maka akan terjadi korosi di pemanas udara dan pemanas udara tersebut akan menjadi rusak (keropos).

Selain alat-alat di atas, terdapat pipa lain yang dilalui air ketel, yaitu:

a. Downcomers (Pipa Turun).

Ditempatkan disepanjang bagian dasar Steam Drum dengan jarak yang sama antara yang satu dengan yang lainnya. Downcomer (pipa turun) tidak terkena panas secara langsung dari ruang bakar karena letaknya berada di luar ruang bakar. Pipa-pipa ini mengalirkan air dari Steam Drum yang digunakan untuk memompa air dari Downcomer dan mensirkulasikannya menuju Waterwall yang kemudian air tersebut

dipanaskan oleh pembakaran di Boiler dan dikirim kembali ke Steam Drum. Proses ini terjadi secara alami tetapi ada juga yang menggunakan Boiler Water Circulating Pump (BWCP) yang berfungsi untuk memompa air dari DownComers menuju water wall.

b. Waterwall tube (Riser).

Merupakan pipa-pipa kecil yang berderet vertikal dalam Boiler, setiap pipa disambung satu sama lain agar membentuk selubung yang kontinyu dalam Boiler. Waterwall bertugas menerima dan mengalirkan air yang berasal dari downcomers kemudian dipanaskan dalam Boiler dan dialirkan ke Steam Drum. Panas yang dihasilkan dari proses pembakaran didalam furnace sebagian diberikan kepada air yang ada didalam tube wall sehingga air berubah menjadi uap. Selain berfungsi untuk membuat air menjadi uap, tube wall juga mencegah penyebaran panas dari dalam furnace ke udara luar.

Energi panas yang timbul dalam ruang pembakaran sebagai hasil pembakaran, setelah dipindahkan ke dalam air yang ada dalam pipa air ketel, akan menaikkan suhu air dan menghasilkan uap. Uap ini akan berkumpul di dalam drum ketel. Uap yang terkumpul dalam drum ketel ini mempunyai tekanan dan suhu yang tinggi dimana bisa mencapai sekitar 100 kg/cm^2 dan 530°C . Energi uap yang tersimpan dalam drum ketel dapat digunakan untuk mendorong atau memanasi sesuatu (uap ini mengandung enthalpy yang besar). Drum ketel berisi air di bagian bawah dan uap yang mengandung enthalpy di bagian atas.

2.1.3 PROSES ENTHALPY UAP MENJADI ENERGI MEKANIK

Steam Turbin uap adalah suatu mesin yang berfungsi untuk merubah energi panas dalam uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Konstruksinya terdiri dari rumah Steam Turbin dan *rotor*. Pada rotor Steam Turbin ditempatkan rangkaian sudu-sudu jalan secara berjajar. Sedangkan pada rumah turbin di pasang sudu tetap. Dalam konstruksinya rangkaian sudu tetap dan rangkaian sudu jalan dipasang berselang-seling seperti digambarkan oleh (Gambar 2.3). Energi panas dalam uap mula-mula diubah menjadi energi kinetik oleh nozzel, selanjutnya uap dengan kecepatan tinggi ini akan mengenai sudu-sudu jalan pada *rotor* steam turbin yang akhirnya menyebabkan putaran rotor. Besar dan kecilnya beban sangat berpengaruh sekali terhadap uap yang dibutuhkan, bila beban cukup tinggi, maka jumlah uap yang dibutuhkan juga besar dan sebaliknya jika beban turun maka harus ada pengurangan uap.

Uap yang berasal dari drum ketel dialirkan ke turbin uap, dan dalam turbin uap, energi (enthalpy) dari uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator. Turbin pada PLTU besar, di atas 150 MW, umumnya terdiri dari 3 jenis turbin yaitu :

1. Turbin tekanan tinggi (high pressure turbine)
2. Turbin tekanan menengah (intermediate pressure turbine)
3. Turbin tekanan rendah (low pressure turbine)

Uap dari drum ketel mula-mula dialirkan ke turbin tekanan tinggi dengan terlebih dahulu melalui pemanas lanjut agar uapnya menjadi kering. Setelah melalui turbin tekanan tinggi, uap di alirkan ke pemanas ulang (*reheater*) untuk

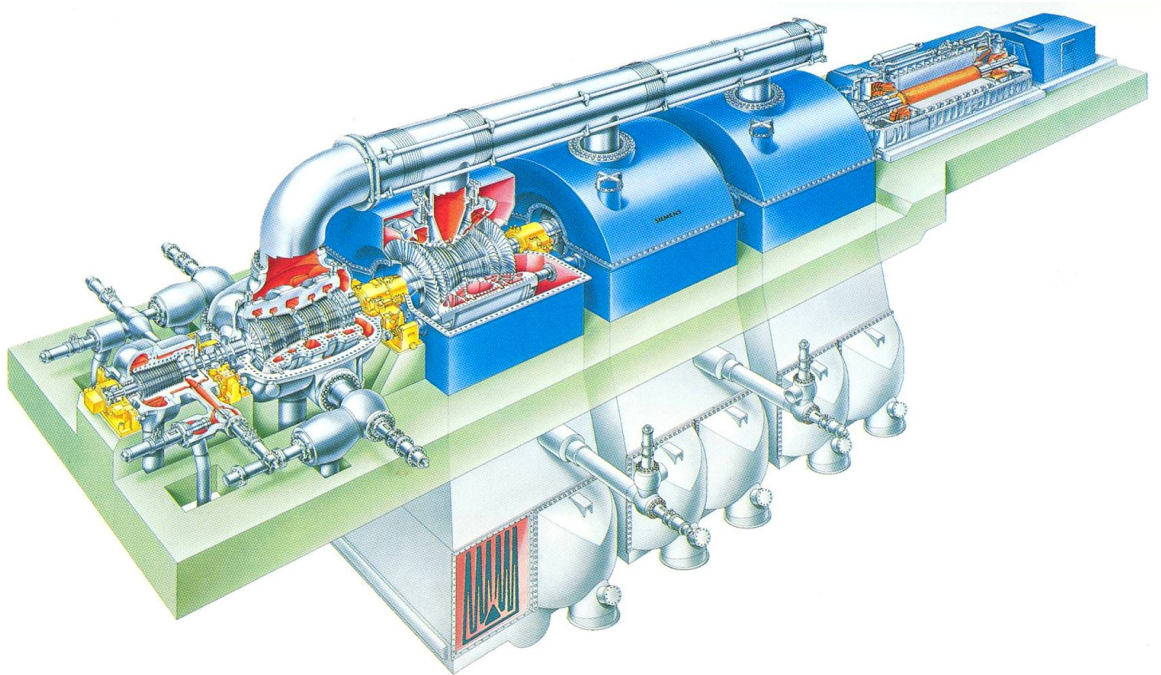
menerima energi panas dari gas buang sehingga suhu uap menjadi naik. Dari pemanas ulang, uap dialirkan ke turbin tekanan menengah. Setelah uap keluar dari turbin tekanan menengah, uap langsung dialirkan ke turbin tekanan rendah. Turbin tekanan rendah umumnya merupakan turbin dengan aliran uap ganda dengan arah aliran yang berlawanan untuk mengurangi gaya aksial turbin (Lihat Gambar 2.3 dan Gambar 2.4)



Sudu jalan

Sudu tetap

Gambar 2.3 *Sudu Tetap dan Sudu Jalan dari Turbin*



Gambar 2.4 *Susunan Turbin Uap dan Kondensor buatan siemens/KWU*

2.1.4 PROSES FASA UAP MENJADI AIR

Proses perubahan fasa uap menjadi air terjadi di dalam *Kondensor*. Setelah uap yang berasal dari *Turbin Tekanan Rendah*, uap dialirkan ke *Kondensor* untuk diembunkan. *Kondensor* memerlukan air pendingin untuk mengembunkan uap yang berasal dari *Turbin Tekanan Rendah (Low Pressure Turbin)*. Oleh karena itu, banyak PLTU yang dibangun di dekat pantai, karena dapat memanfaatkan air laut sebagai air pendingin *kondensor* dalam jumlah yang besar. Tetapi tidak jarang juga PLTU yang dibangun di pusat kota. Biasanya PLTU yang di bangun di pusat kota atau jauh dari pantai, menggunakan *Cooling Tower* sebagai tempat

penampungan air pendingin. Di lain pihak, penggunaan air laut sebagai pendingin menimbulkan masalah-masalah diantaranya sebagai berikut :

- a. Material yang dialiri air laut harus material anti korosi (tahan terhadap air laut).
- b. Bintang laut dan binatang-binatang laut yang lain ikut masuk dan berkembang biak dalam saluran air pendingin yang memerlukan pembersihan secara periodik.
- c. Selain binatang laut, kotoran air laut juga ikut masuk dan akan menyumbat pipa-pipa kondensor sehingga diperlukan pula pembersihan secara rutin.
- d. Adanya resiko air laut masuk kedalam sirkulasi uap. Hal ini dapat berbahaya bagi sudu-sudu turbin uap. Oleh karena itu harus dicegah dan dijaga. Air ketel selain dikontrol daya hantar listriknya dikontrol pula PH-nya dalam mikro seamens (μ siemens). Jika diketahui mikro siemensnya besar maka air ketel mengandung garam. PLTU harus segera stop karena turbin dapat keropos karena terkikis air garam.

Uap bekas yang telah didinginkan di dalam *Kondensor* tersebut akan terkondensasi dari fasa uap menjadi air kondensat. Proses yang terjadi di dalam Kondensor yaitu uap bekas yang berasal dari *LP Turbin* bersentuhan langsung dengan pipa yang didalamnya dialiri pendingin berupa air laut atau air pendingin yang berasal dari *Cooling Tower*. Air laut selain berfungsi sebagai media heat transfer (penukar panas) juga berfungsi untuk mendinginkan *Kondensor* dan mendinginkan *Closed Cooling System* (air pendingin). *Closed Cooling System* ini mendinginkan berbagai peralatan yang membutuhkan pendinginan seperti Air Compressor, Pump dan juga penting untuk mendinginkan minyak pelumas untuk

pelumasan Turbin. Proses pertukaran panas antar Close Cooling dengan air laut terjadi pada alat yang disebut *Heat Exchanger*. Kondenser bekerja dalam kondisi vakum, hal ini dikarenakan proses kondensasi yang terjadi yaitu perubahan steam ke air menyebabkan berkurangnya volume. Untuk menjaga agar kondensor dalam keadaan vakum, maka gas-gas yang dilepas dari steam (ketika steam berubah menjadi air) dipompa keluar oleh vakum pump. Alasan lain keadaan vakum adalah efisiensi, steam yang diambil dari turbin adalah Enthalpy Steam (selisih steam masuk dan keluar) sehingga tekanan diminimalkan agar energi yang dimanfaatkan semakin besar karena Enthalpynya juga besar.

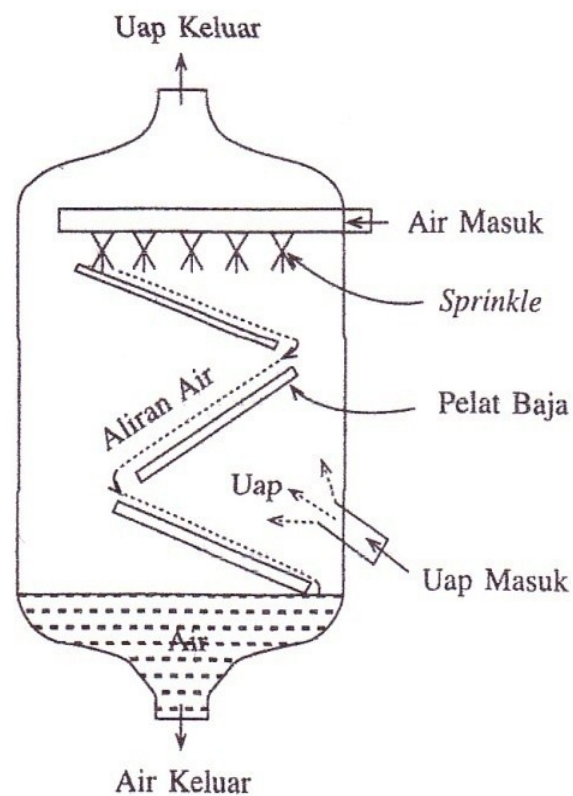
Uap yang telah terkondensasi menjadi air kondensat yang selanjutnya di tampung di dalam bak penampung air kondensat (*Condensat Hotwell*). Air kondensat mengalir menuju *Condensat Extraction Pump (CEP)* untuk kemudian menuju pemanas air kondensat *Pemanas air tekanan rendah / Low Pressure Heater (LP Heater)* yang fungsinya untuk memanaskan air condensat tahap pertama. LP Heater mendapat dari uap yang sengaja di ambil dari Turbin Tekanan Rendah untuk memanaskan air condensat. Selanjutnya air mengalir menuju *Deaerator*. Air kondensat di tampung dalam *Storage Tank Deaerator*. Dengan adanya PreHeater (LP Heater dan HP Heater) enthalpy dari uap yang diambil dari turbin tidak menghasilkan daya ke Turbin, melainkan melalui LP Heater maupun HP Heater enthalpy ini masuk ke dalam air yang menuju Boiler. Uap ini setelah melalui Pre Heater (LP Heater maupun HP Heater) akan menuju ke Kondensor dan mengembun di Kondensor. Akibat dari proses tersebut di atas laten heat uap menjadi air berkurang. Pengurangan ini lebih besar dari pada pengurangan daya

yang akan dihasilkan melalui turbin apabila uap ini tidak di sadap ke Pre Heater (LP Heater/HP Heater).

Deaerator Berfungsi untuk menyerap atau menghilangkan gas – gas yang terkandung pada air pengisi Boiler, terutama gas O_2 , karena gas ini akan menimbulkan korosi. Gas – gas lain yang cukup berbahaya adalah karbon dioksida (CO_2). Gas O_2 dan CO_2 akan bereaksi dengan meterial Boiler dan menimbulkan korosi yang sangat merugikan. Air ketel dilewatkan dalam *vacum deaerator* untuk mengurangi O_2 dan CO_2 kemudian dilewatkan lagi dalam proses penukar ion, maka asam-asam yang tertinggal dalam larutan akan dihilangkan dan menghasilkan air yang mungkin lebih murni dari air destilasi. Kadar O_2 juga harus dibatasi agar tidak merusak ketel maupun turbin, air yang masih mengandung O_2 disemprotkan ke *Steam Daerator* menjadi butir-butir kecil dan dalam arah berlawanan disemprotkan uap panas yang akan menangkap O_2 dan dikeluarkan melalui valve pelepas udara/gas (Gambar 2.5).

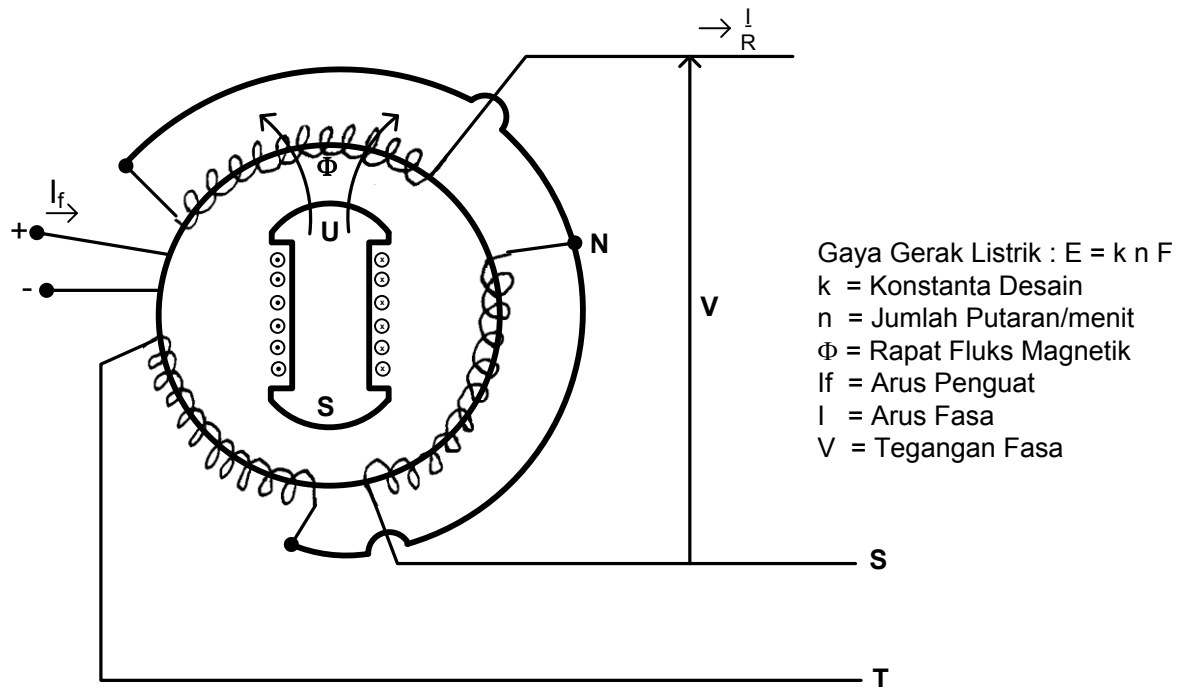
Sekalipun siklus fluida kerjanya merupakan siklus tertutup, namun jumlah air dalam siklus akan mengalami pengurangan. Pengurangan air ini disebabkan oleh kebocoran baik yang disengaja seperti blowdown pada boiler maupun yang tidak disengaja. Untuk mengganti air yang hilang, maka perlu adanya penambahan air ke dalam siklus. Pada Kondenser terdapat Make-Up Water untuk menambah volume air. Make Up water diambil dari Make Up Demineralizing. Kriteria air penambah (Make-Up water) ini harus sama dengan air yang ada dalam siklus. Dalam tangki pengolahan air, air diolah agar memenuhi mutu yang diinginkan untuk air ketel. Dari tangki pengolahan air, Air tersebut dipompakan oleh Boiler Feed Pump (BFP) menuju Steam Drum Boiler dengan melewati

Pemanas air tekanan tinggi / High pressure Heater (HP Heater) yang di ambil dari uap ekstraksi Turbin Tekanan Tinggi kemudian masuk ke Economizer. Dalam Ekonomizer, air mengambil energi panas dari gas buang sehingga suhu air menjadi naik, kemudian air masuk ke Steam Drum. Siklus air dan Uap ini berlangsung secara terus-menerus selama unit beroperasi.



Gambar 2.5 *Proses kerja Deaerator untuk membuang gas-gas yang ada dalam air boiler*

2.1.5 PROSES ENERGI MEKANIK MENJADI ENERGI LISTRIK



Gambar 2.6 Prinsip Kerja Generator Sinkron

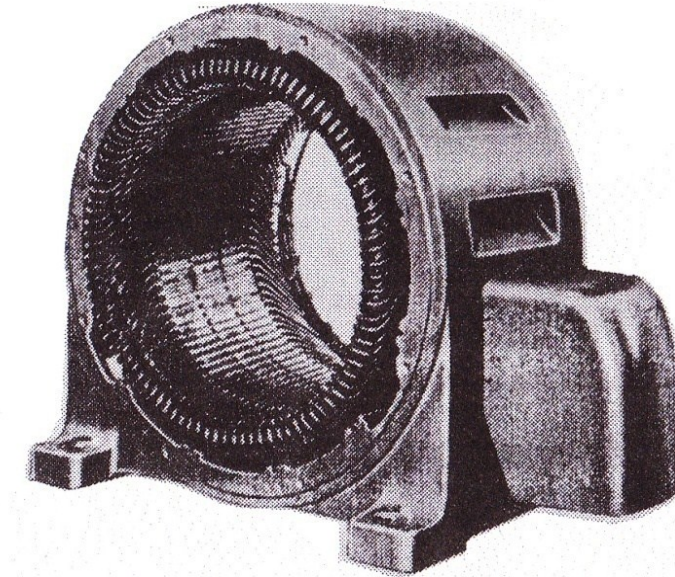
Generator berfungsi untuk mengkonversikan energi mekanik (energi poros) dari turbin menjadi energi listrik dengan cara mengkoplingkan poros generator dengan poros turbin. Prinsip kerjanya berdasarkan hukum Faraday tentang induksi elektro magnet, yaitu bila suatu konduktor digerakan dalam medan magnet maka akan dibangkitkan gaya gerak listrik (GGL). Generator sinkron pada prinsipnya terdiri atas 2 bagian utama, yaitu :

a. Bagian Berputar (ROTOR)

Rotor adalah bagian generator yang berputar. Rotor berupa kutub elektromagnet yang dililitkan kumparan arus searah. Pada rotor terdapat

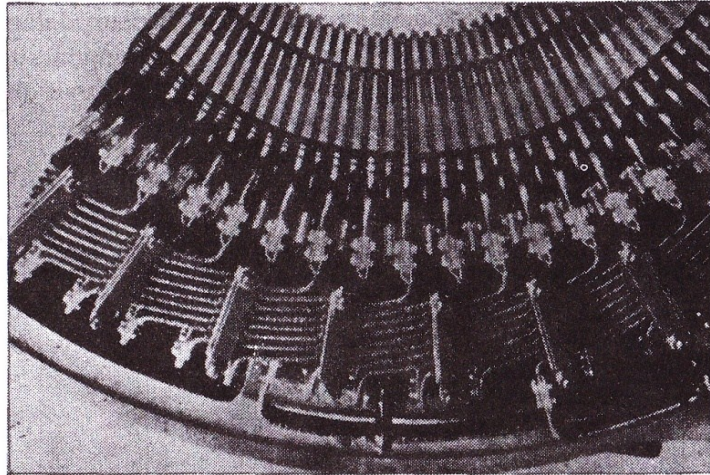
kumparan konduktor sebagai pembangkit medan magnet utama. Medan magnet ini timbul karena adanya arus yang mengalir pada kumparan rotor yang di peroleh dari exciter. Jika rotor berputar , maka medan magnet akan memotong kumparan jangkar stator, sehingga akan timbul Gaya Gerak Listrik (GGL), yang selanjutnya akan disalurkan ke terminal generator.

b. Bagian Diam (STATOR)



Gambar 2.7 *Stator Generator Fasa Tiga*¹

¹ Djuanda Djoekardi, Mesin-Mesin listrik mesin sinkron (Jakarta : Penerbit universitas trisakti, 1997), hal.8.



Gambar 2.8 *Tepi Stator dengan Kepala Belitan yang dipasang kuat-kuat pada rumah ²*

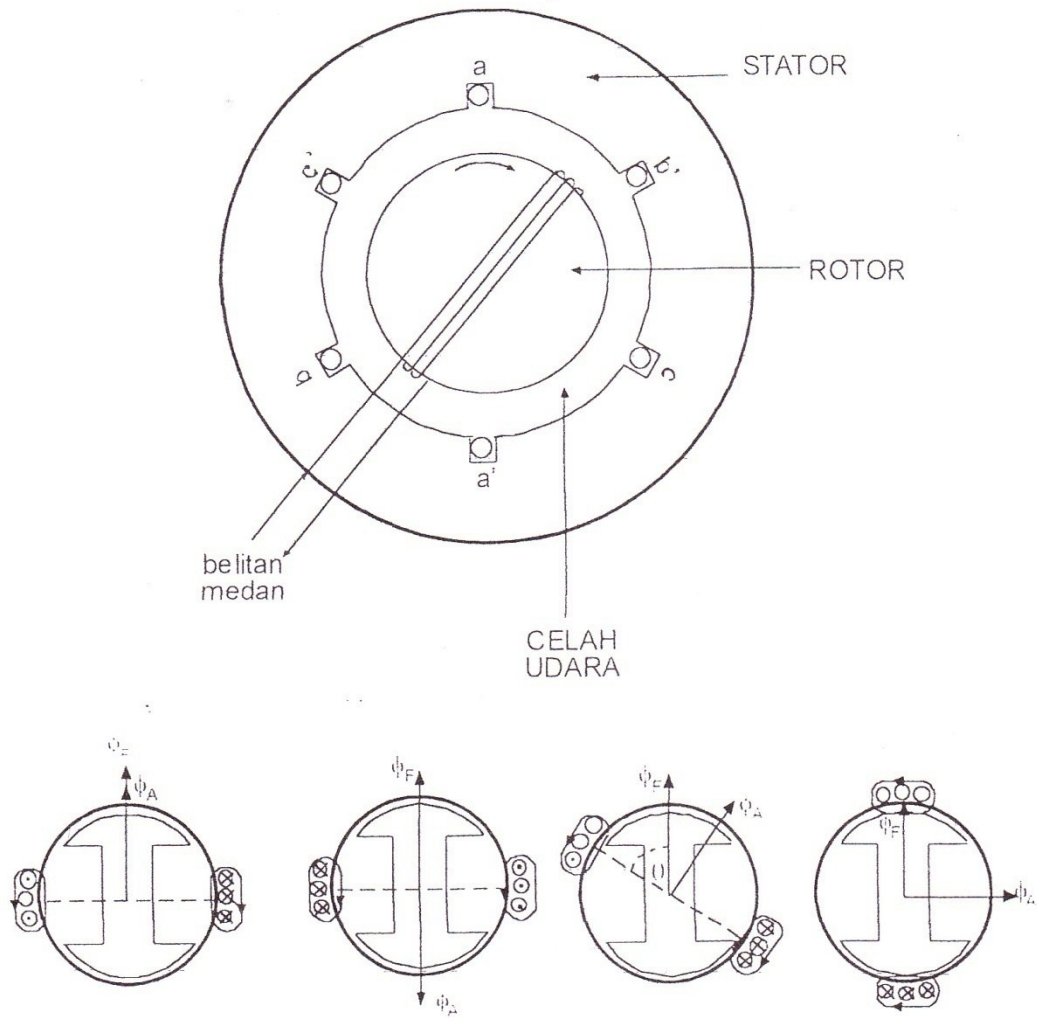
Stator adalah bagian dari generator yang tidak bergerak (Statis). Stator mempunyai alur-alur yang memanjang yang di tempatkan oleh kumparan stator. Pada stator ada 3 kumparan yang jumlah lilitannya dan ukuran konduktornya sama, hanya saja letaknya berbeda 120° .

Jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / external pole generator) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe

² Prof. Ir. Abdul Kadir, *Mesin Sinkron*, (Jakarta : Penerbit Djambatan, 1999), hal. 44.

generator dengan kutub internal (internal pole generator), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang diset sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut 120° .

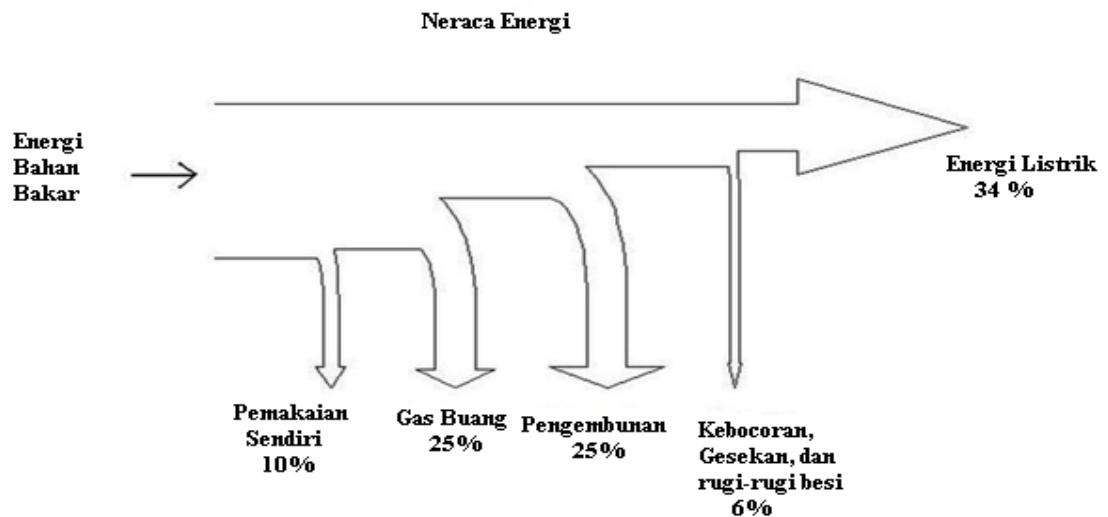
Pada rotor kutub sepatu, fluks terdistribusi sinusoidal didapatkan dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Sedangkan pada rotor silinder yang sering digunakan pada Turbin PLTU, kumparan rotor disusun secara khusus untuk mendapatkan fluks terdistribusi secara sinusoidal. Untuk tipe generator dengan kutub internal (internal pole generator), suplai DC yang dihubungkan ke kumparan rotor melalui slip ring dan sikat untuk menghasilkan medan magnet merupakan eksitasi daya rendah. Jika rotor menggunakan magnet permanen, maka slip ring dan sikat karbon tidak begitu diperlukan.



Gambar 2.9 *Konstruksi Generator Sinkron*

2.1.6 NERACA ENERGI

Energi *Input*, *Output* dan *Losses* dapat digambarkan dalam neraca energi sebagai berikut :



Gambar 2.10 *Neraca Energi*

Energi bahan bakar dalam proses ke energi listrik mengalami proses yang cukup panjang. Pada (Gambar 2.10) terlihat bahwa efisiensi dari PLTU berkisar $\pm 34\%$. Efisiensi menyatakan hubungan antara input dan output . Karena adanya rugi-rugi (*Losses*) yang tidak dapat dihindarkan dalam proses perubahan energi di PLTU maka :

$$\text{KELUARAN} = \text{MASUKAN} - \text{RUGI-RUGI} \quad (2.1)$$

$$\text{EFISIENSI} = \frac{\text{KELUARAN}}{\text{MASUKAN}} \quad (2.2)$$

ATAU

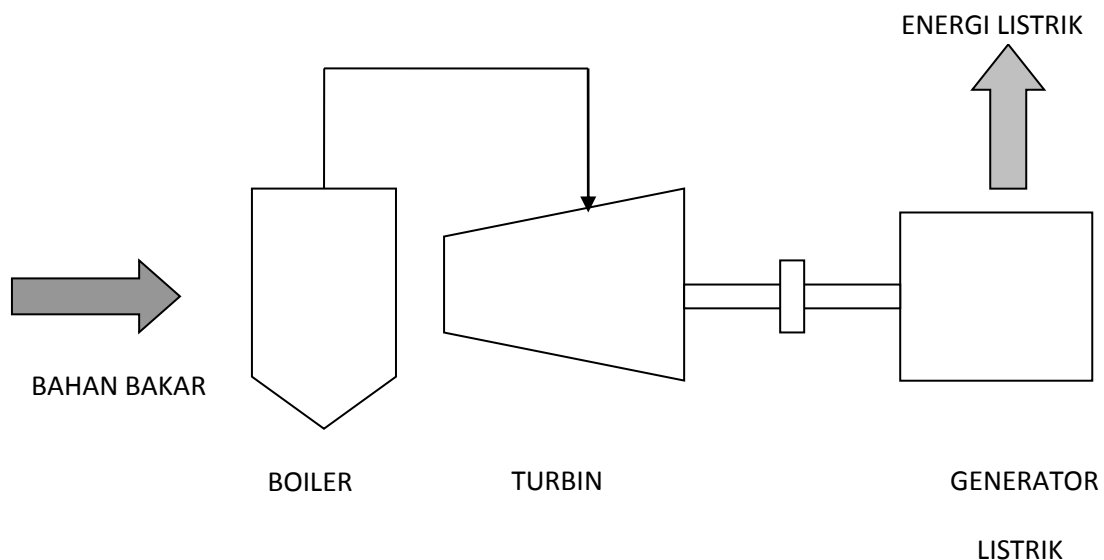
$$\text{EFISIENSI} = \frac{\text{MASUKAN} - \text{RUGI-RUGI}}{\text{MASUKAN}} \quad (2.3)$$

Pernyataan matematis di atas menyatakan bahwa efisiensi merupakan perbandingan OUTPUT dengan INPUT. Dalam kondisi ideal yaitu LOSSES = 0 maka besarnya efisiensi adalah 1 (satu) atau 100%. Tetapi dalam kenyataannya sebuah PLTU akan mengalami rugi-rugi (losses) pada proses konversi energinya. Akibat keseluruhan rantai proses konversi energi, output energi listrik di peroleh dari input bahan bakar.

Pada (Gambar 2.10) dapat terlihat bahwa efisiensi PLTU berkisar $\pm 34 \%$, karena energi terbuang sebesar 25% pada gas buang, 10% untuk pemakaian sendiri, Pengembunan di kondensor sebesar 25%, juga kebocoran uap dan gesekan generator sebesar 6%.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, PLTU mengubah energi kimia (bahan bakar) menjadi energi listrik mengalami proses yang panjang (lihat Gambar 2.11).

1. Energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi kalor. Proses ini terjadi di dalam ruang bakar.
2. Energi kalor diubah menjadi enthalpy. Proses ini terjadi di pipa-pipa air boiler dan dikumpulkan dalam drum.
3. Enthalpy uap diubah menjadi energi mekanis. Proses ini terjadi di dalam Turbin.
4. Energi mekanis diubah menjadi energi listrik. Proses ini terjadi di Generator listrik.



Gambar 2.11 *Perubahan (Konversi) Energi di PLTU*

Pada PLTU modern dengan bahan bakar batubara, efisiensi siklusnya berkisar sekitar 34% saja karena terdapat rugi-rugi (losses) sebesar 66%.

2.2 DASAR SISTEM KONTROL

Sistem kontrol merupakan hal yang penting di dunia industri saat ini. Pengertian dari sistem itu sendiri adalah sebuah susunan komponen fisik yang saling terhubung dan membentuk satu kesatuan untuk melakukan aksi tertentu. Sedangkan kontrol adalah mengatur, mengarahkan, memerintahkan. Jadi sistem kontrol adalah proses pengaturan ataupun pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (*variabel, parameter*) sehingga berada pada suatu harga (*range*) untuk melakukan suatu aksi tertentu. Contoh sistem kontrol industri seperti pengontrolan variabel-variabel temperatur (*temperature*), tekanan (*pressure*), aliran (*flow*) level, kecepatan (*speed*), dan lain sebagainya. Variabel-variabel ini adalah parameter-parameter keluaran (*output*) yang harus dijaga tetap sesuai dengan keinginan yang telah ditetapkan terlebih dahulu yang disebut dengan *setpoint / set value (SV)*.

Definisi yang biasa digunakan dalam sistem kontrol :

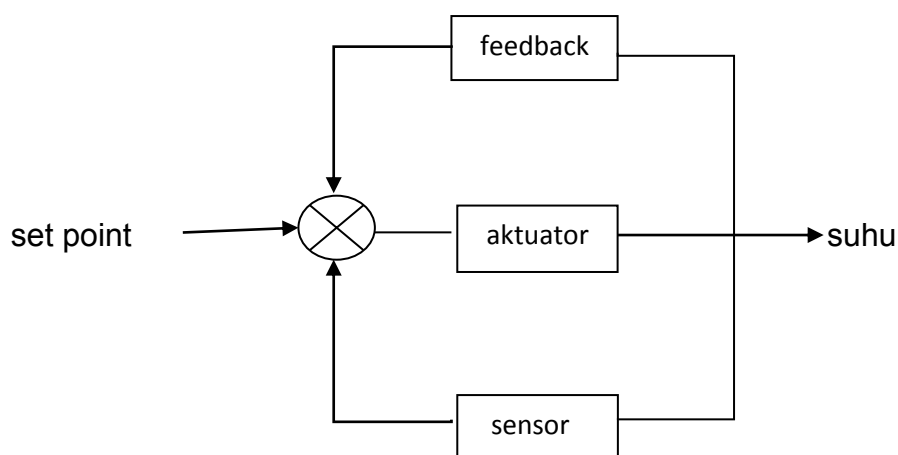
- a. Plant adalah seperangkat peralatan, terdiri dari beberapa bagian mesin yang bekerja sama yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu.
- b. Proses adalah perkembangan alamiah atau suatu operasi yang sengaja dibuat yang berlangsung secara kontinyu , yang terdiri dari beberapa aksi atau perubahan yang dikontrol, yang diarahkan secara sistematis menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu, jadi setiap operasi yang di kontrol disebut *proses*.

- c. Gangguan (*disturbances*) adalah suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran sistem karena menyebabkan perubahan pada variabel yang dikontrol.
- d. Sistem kontrol berumpan – balik (*feedback control system*) adalah sistem kontrol yang cenderung menjaga hubungan yang telah ditentukan antara keluaran dan masukan acuan dengan membandingkan dan menggunakan selisihnya sebagai alat pengontrolan.
- e. Set point adalah nilai dari *variabel kontrol* yang diinginkan.
- f. Sensor disebut juga “mata” sistem berfungsi untuk mengukur variabel kontrol dan menghasilkan sinyal output yang diinginkan.
- g. Variabel yang dikontrol yaitu nilai aktual yang diawasi dan dijaga pada nilai tertentu yang diinginkan didalam proses.
- h. Variabel yang dimanipulasi yaitu besaran fisik yang merupakan hasil dari kerja yang dilakukan aktuator atau besaran/keadaan keadaan yang diubah oleh kontroler untuk mempengaruhi nilai variabel yang dikontrol.
- i. Error detector yaitu pembanding set point dengan sinyal feedback dan menghasilkan sinyal output yang sesuai dengan perbedaan tersebut.
- j. Aktuator (penggerak) adalah alat yang secara fisik melakukan keinginan kontroler dengan suntikan energi tertentu. Aktuator berfungsi untuk merubah sinyal input yang di dapat dari kontroler menjadi gerakan mekanis.
- k. Kontroler yaitu “otak” dari sistem. Kontroler menerima error sebagai input dan menghasilkan sinyal kontrol yang menyebabkan *variabel kontrol* menjadi sama dengan *set point*.
- l. Sinyal error yaitu output dari error detektor.

m. Feedback di gunakan untuk mengerem action supaya tidak terjadi osilasi.

Persyaratan umum sistem kontrol yaitu :

1. Setiap sistem kontrol harus stabil
2. Sistem kontrol harus mempunyai kestabilan relatif yang layak.
3. Kecepatan respon harus cepat dan menunjukkan peredaman yang kecil sekali.
4. Suatu sistem kontrol harus mampu memperkecil kesalahan sampai nol atau sampai pada suatu harga yang dapat di toleransi.



Gambar 2.12 Blok Diagram Sistem Kontrol Sederhana

Pada (Gambar 2.12) dipasang feedback yang berfungsi untuk mengerem/mengontrol apabila besaran yang di kontrol terlalu besar/terlalu kecil atau sesuai dengan input yang diberikan agar autput sesuai dengan permintaan.

Berdasarkan pelaku tindakan maka sistem kontrol dibedakan atas sistem kontrol otomatis dan sistem kontrol manual.

1. Sistem Otomatis (*automatic system*)

Yaitu sistem kontrol bila pelaku tindakan adalah suatu peralatan dan bukan manusia.

2. Sistem Manual (*manual system*)

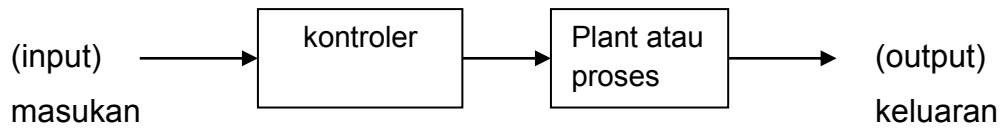
Yaitu sistem kontrol yang pelaku tindakan adalah manusia itu sendiri.

Sistem kontrol berdasarkan aliran sinyal kontrol dibagi atas dua, yaitu :

1. **Sistem Kontrol Loop Terbuka (Open loop Controls)**

Sistem kontrol loop terbuka (open loop control) yaitu sistem kontrol yang keluarannya tidak mempunyai pengaruh terhadap aksi kontrol. Dengan kata lain, sistem kontrol loop terbuka keluarannya tidak dapat digunakan sebagai perbandingan umpan balik dengan masukan. Suatu contoh sederhana adalah mesin cuci. Mesin ini tidak mengukur sinyal keluaran yaitu tingkat kebersihan pakaian.

Dalam suatu sistem kontrol loop terbuka, keluaran tidak dapat dibandingkan dengan masukan acuan. Dengan adanya gangguan, sistem kontrol loop terbuka tidak dapat melaksanakan tugas seperti yang diharapkan. Sistem kontrol loop terbuka dapat digunakan, hanya jika hubungan antara masukan dan keluaran diketahui dan tidak terdapat gangguan internal maupun eksternal.



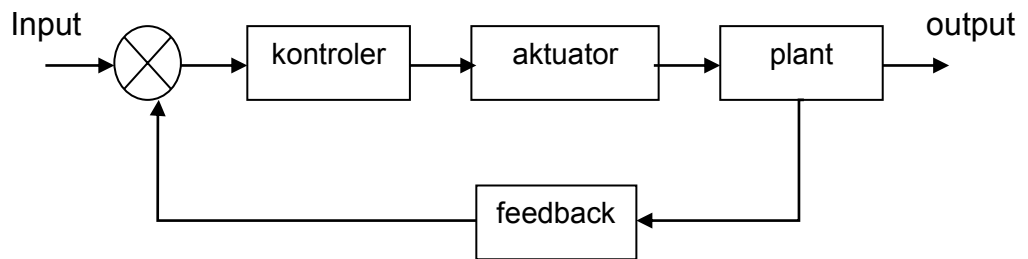
Gambar 2.13 *Blok Diagram Sistem Kontrol Terbuka*

2. Sistem Kontrol Loop Tertutup (Close loop Controls)

Sistem kontrol loop tertutup sering kali disebut sistem kontrol umpan balik. Istilah kontrol umpan balik dan kontrol loop tertutup dapat saling dipertukarkan penggunaannya. Pada sistem kontrol loop tertutup, sinyal kesalahan yang bekerja, yaitu perbedaan antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik (yang mungkin sinyal keluarannya sendiri atau fungsi dari sinyal keluaran dan turunannya sendiri), kemudian diteruskan ke kontroler sedemikian rupa untuk mengurangi kesalahan dan membawa keluaran sistem ke nilai yang dikehendaki. Istilah kontrol loop tertutup selalu berarti penggunaan aksi kontrol umpan balik untuk mengurangi kesalahan sistem.

Keuntungan sistem loop tertutup adalah adanya pemanfaatan nilai umpan balik yang dapat membuat respon sistem kurang peka terhadap gangguan eksternal dan perubahan internal pada parameter sistem.

Kerugiannya adalah tidak dapat mengambil aksi perbaikan terhadap suatu gangguan sebelum gangguan tersebut mempengaruhi nilai prosesnya.



Gambar 2.14 Diagram Blok Sistem Kontrol Tertutup

3. Perbandingan antara sistem kontrol loop tertutup dan loop terbuka

Tabel 2.1 Tabel Perbandingan Sistem Kontrol Loop Tertutup dan Sistem Kontrol Loop Terbuka

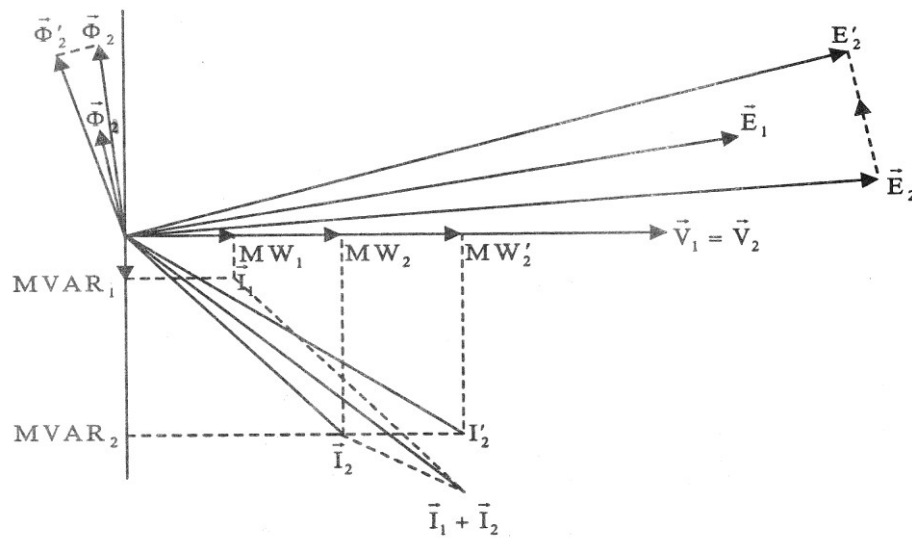
No	Sistem Kontrol Loop Tertutup	Sistem Kontrol loop terbuka
1.	Penggunaan umpan balik membuat respon sistem relatif kurang peka terhadap gangguan internal dan eksternal system	Hal ini tidak mungkin diperoleh pada sistem kontrol loop terbuka
2.	Kestabilan selalu merupakan persoalan utama, karena cenderung terjadi kesalahan akibat koreksi berlebih yang dapat menimbulkan osilasi pada amplitudo.	Kestabilan bukan merupakan persoalan utama.
3.	Lebih rumit dan biasanya lebih susah di buat	Lebih mudah dibuat
4.	Dapat menggunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti dan murah untuk mendapatkan pengontrolan "plant" yang teliti.	Tidak dapat
5.	Lebih stabil dan teliti	Kurang stabil dan tingkat ketelitian yang rendah, oleh karena itu perlu dikalibrasi secara berkala.
6.	Kebutuhan daya yang besar	Kebutuhan daya relatif kecil

2.3. DAYA AKTIF DAN FREKUENSI

Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi para pelanggan dengan frekuensi yang praktis konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem. Sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif selalu berubah sepanjang waktu.

Sehubungan dengan hal ini, maka untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan atau pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atas daya aktif. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator.

Dalam sistem tenaga listrik umumnya digunakan generator sinkron tiga fasa untuk pembangkit tenaga listrik yang utama, maka pengaturan frekuensi sistem praktis tergantung pada karakteristik generator sinkron.



Gambar 2.15 Diagram vektor dari Fluks Magnetik (Φ), Gaya Gerak Listrik (E), Arus (I), dan Tegangan Jepit dari sebuah Generator Sinkron

Pengaturan arus medan generator (Gambar 2.15) hanya akan mempengaruhi panjang pendeknya vektor Φ yang selanjutnya akan pula mempengaruhi panjang pendeknya vektor E karena vektor E sebanding dengan $\frac{d\Phi}{dt}$.

Penambahan kopel pemutar generator memerlukan tambahan bahan bakar pada unit pembangkit termis. Oleh karena itu produksi MWH memerlukan penambahan bahan bakar.

Menurut hukum Newton ada hubungan antara Kopel mekanis penggerak generator dengan perputaran generator, yaitu :

$$(T_G - T_B) = H \times \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)^3$$

Dimana :

T_G = Kopel penggerak generator.

T_B = Kopel beban yang membebani generator.

H = Momen inersia dari generator beserta mesin penggeraknya.

ω = Kecepatan sudut perputaran generator.

Sedangkan frekuensi yang dibutuhkan generator adalah :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.5)$$

Hal ini berarti bahwa pengaturan frekuensi dalam sistem berarti pula pengaturan kopel penggerak generator atau juga berarti pengaturan daya aktif dari generator. Ditinjau dari segi mesin penggerak generator ini berarti bahwa pengaturan frekuensi sistem adalah pengaturan pemberian bahan bakar pada unit termis.

Ditinjau dari segi beban sistem, frekuensi akan turun apabila daya aktif yang dibangkitkan tidak mencukupi kebutuhan beban dan sebaliknya frekuensi akan naik apabila ada penambahan daya aktif dalam sistem.

Secara mekanis dengan melihat persamaan-persamaan (2-1) dan (2-2) ini berarti bahwa apabila :

$T_G - T_B = \Delta T < 0$, maka $\frac{d\omega}{dt} < 0$, frekuensi turun

³ Djiteng Marsudi, Operasi sistem Tenaga Listrik edisi kedua (yogyakarta : Graha Ilmu, 2006), hal. 226.

$T_G - T_B = \Delta T > 0$, maka $\frac{d\omega}{dt} > 0$, frekuensi naik

Secara tidak langsung penyediaan daya reaktif dapat pula mempengaruhi frekuensi sistem, karena penyediaan daya reaktif mempunyai pengaruh besar terhadap kenaikan tegangan yang selanjutnya dapat menyebabkan kenaikan beban daya aktif.

2.4. DAYA REAKTIF DAN TEGANGAN

Kebanyakan generator sinkron bekerja paralel dengan generator lainnya sehingga perlu diatur beban yang akan dipikulnya. Yang terdiri atas beban aktif dan beban reaktif.

Daya reaktif diatur dengan mengatur besarnya penguatan medan sehingga generator bekerja dengan faktor daya induktif atau kapasitif yang diinginkan. Operasi stabil dapat dicapai dengan kerja sama secara terpadu antara governor dan penguat medan.

Mesin sinkron terkadang dibuat dengan rotor magnit permanen akan tetapi lazimnya rotor merupakan elektromagnet dengan penguatan.

Maksud dari pengaturan penguatan adalah :

- a. Untuk mengendalikan tegangan dalam keadaan kerja normal.
- b. Untuk mengatur tegangan dalam keadaan gangguan.
- c. Untuk mengatur pemikul beban reaktif antara generator-generator yang bekerja paralel.