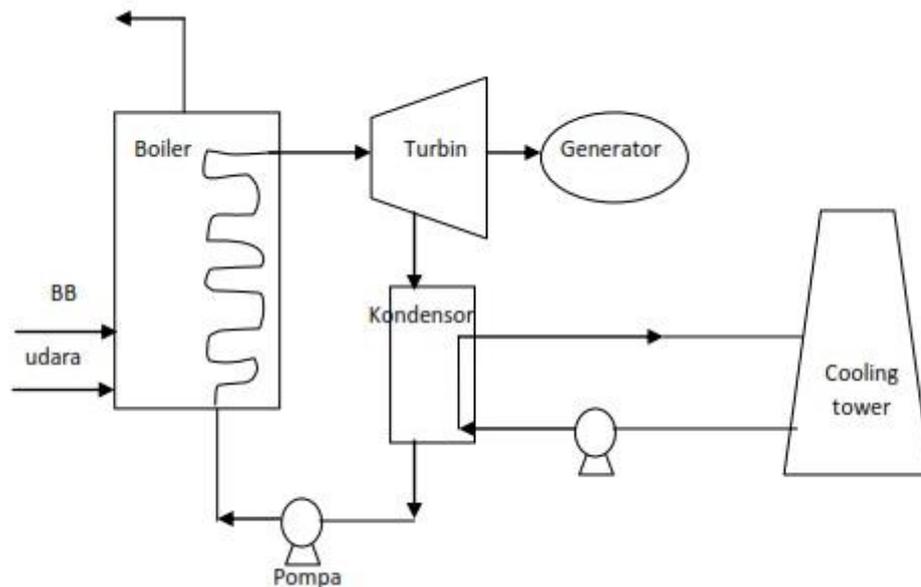


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PLTU (Pembangkit listrik Tenaga Uap)

2.1.1 Pengertian PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengendalikan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang di hubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu-bara dan minyak bakar serta MFO untuk start awal. Komponen- komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada gambar 1.



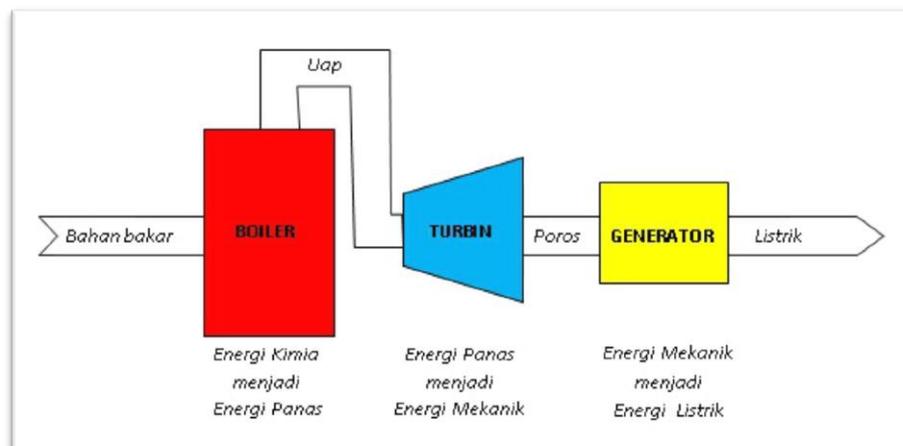
Gambar 1. Komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sistem kerja PLTU menggunakan bahan bakar minyak HSD (solar) dan gas alam. Kelebihan dari PLTU adalah daya yang dihasilkan sangat besar. Konsumsi energi pada peralatan PLTU bersumber dari putaran turbin uap. PLTU adalah suatu pembangkit yang menggunakan uap sebagai penggerak utama (prime mover). Untuk menghasilkan uap, maka haruslah ada proses pembakaran untuk memanaskan air. PLTU merupakan suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang mengkonversikan

energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan proses sudu-sudu turbin menggerakkan poros turbin, untuk selanjutnya poros turbin menggerakkan generator yang kemudian dibangkitkannya energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan akan menyuplai alat- alat yang disebut beban.

Prinsip Kerja PLTU

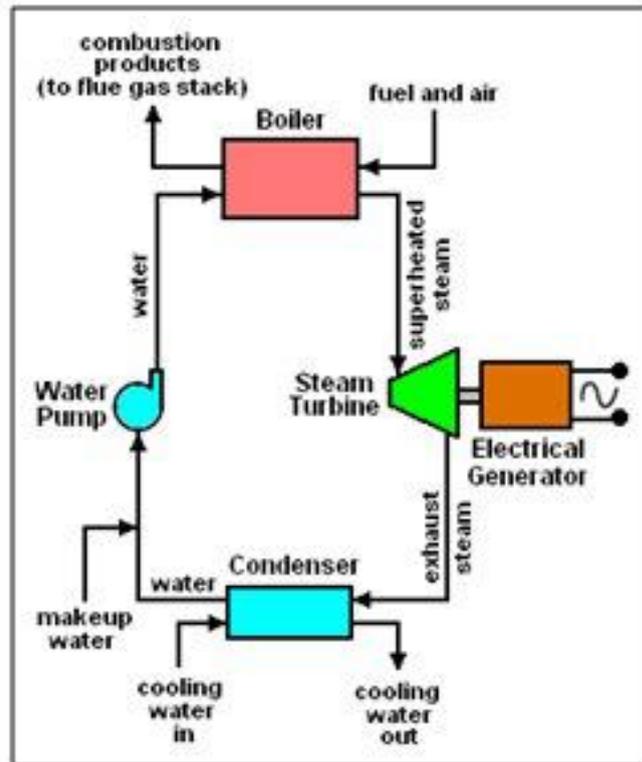
Prinsip kerja dari PLTU adalah dengan menggunakan siklus air-uap-air yang merupakan suatu sistem tertutup air dari kondensat atau air dari hasil proses pengkondensasian di kondensor dan *make up water* (air yang dimurnikan) dipompa oleh *condensat pump* ke pemanas tekanan rendah. Disini air dipanasi kemudian dimasukkan oleh *daerator* untuk menghilangkan oksigen, kemudian air ini dipompa oleh *boiler feed water pump* masuk ke *economizer*. Dari *economizer* yang selanjutnya dialirkan ke pipa untuk dipanaskan pada *tube boiler*.



Gambar 2. Proses Konversi Energi PLTU

Pada *tube*, air dipanasi berbentuk uap air. Uap air ini dikumpulkan kembali pada steam drum, kemudian dipanaskan lebih lanjut pada superheater sudah berubah menjadi uap kering yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi, dan selanjutnya uap ini digunakan untuk menggerakkan sudu turbin tekanan tinggi, untuk sudu turbin menggerakkan poros turbin. Hasil dari putaran poros turbin kemudian memutar poros generator yang dihubungkan dengan *coupling*, dari putaran ini dihasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dari generator disalurkan dan di distribusikan lebih lanjut ke pelanggan. Uap bebas dari turbin

selanjutnya di kondensasikan dari kondensor dan bersama air dari *make up water pump* dipompa lagi oleh pompa kondensat masuk ke pemanas tekanan rendah, *daerator*, *boiler feed water pump*, pemanas tekanan tinggi, *economizer*, dan akhirnya menuju *boiler* untuk dipanaskan menjadi uap lagi. Proses ini akan terjadi berulang-ulang.



Gambar 3. Siklus fluida kerja sederhana pada PLTU

Siklus kerja PLTU yang merupakan siklus tertutup dapat digambarkan dengan diagram $T - s$ (Temperatur – entropi). Siklus ini adalah penerapan siklus rankine ideal. Adapun urutan langkahnya adalah sebagai berikut :

- $a - b$: Air dipompa dari tekanan P_2 menjadi P_1 . Langkah ini adalah langkah kompresi isentropis, dan proses ini terjadi pada pompa air pengisi.
- $b - c$: Air bertekanan ini dinaikkan temperaturnya hingga mencapai titik didih. Terjadi di *LP heater*, *HP heater* dan *Economiser*.
- $c - d$: Air berubah wujud menjadi uap jenuh. Langkah ini disebut *vapourising* (penguapan) dengan proses *isobar isothermis*, terjadi di

boiler yaitu di *wall tube* (riser) dan *steam drum*.

- d – e : Uap dipanaskan lebih lanjut hingga uap mencapai temperatur kerjanya menjadi uap panas lanjut (*superheated vapour*). Langkah ini terjadi di *superheater boiler* dengan proses *isobar*.
- e – f : Uap melakukan kerja sehingga tekanan dan temperaturnya turun. Langkah ini adalah langkah *ekspansi isentropis*, dan terjadi didalam turbin.
- f – a : Pembuangan panas laten uap sehingga berubah menjadi air kondensat. Langkah ini adalah *isobar isothermis*, dan terjadi didalam kondensor.

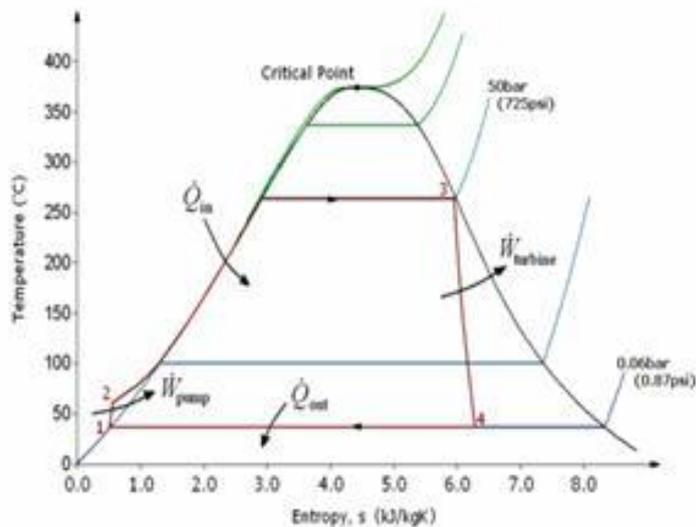
2.1.2 Siklus Termodinamika

Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas yang disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida bergerak. Pada *steam boiler*, ini akan menjadi *reversible* tekanan konstan pada proses pemanasan air untuk menjadi uap air, lalu pada turbin proses ideal akan menjadi *reversible* ekspansi adiabatik dari uap, pada kondenser akan menjadi *reversible* tekanan konstan dari panas uap kondensasi yang masih *saturated liquid* dan pada proses ideal dari pompa akan terjadi *reversible* kompresi adiabatik pada cairan akhir dengan mengetahui tekanannya. Ini adalah siklus *reversible*, yaitu keempat proses tersebut terjadi secara ideal yang biasa disebut Siklus Rankine.

Salah satu peralatan yang sangat penting di dalam suatu pembangkit tenaga listrik adalah Boiler (Steam Generator) atau yang biasanya disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar kalor, dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran diubah menjadi energi potensial yang berupa uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama turbin uap. Energi panas diperoleh dengan jalan pembakaran bahan bakar di ruang bakar.

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 sistem 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. Berikut ini adalah gambar diagram siklus rankine



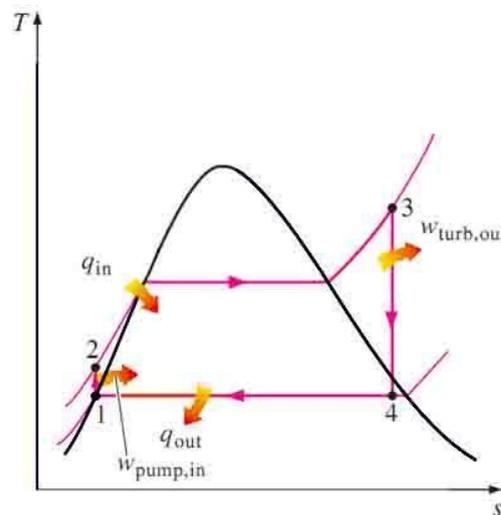
Gambar 4. Siklus Rankine Ideal

Siklus Rankin Ideal

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, perubahan *entalpi fluida* kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperature. Temperature 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 digambarkan dalam diagram T-S dan H-S seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 5. Siklus rankine sederhana

Siklus rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

1-2 kompresi isentropic dengan pompa.

2-3 penambahan panas dalam boiler secara isobar

3-4 ekspansi isentropic pada turbin

4-1 pelepasan panas pada condenser secara isobar dan isothermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperature air akan meningkat selama kompresi *isentropic* 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 oleh boiler ke air pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang dihasilkan steam ini disebut sebagai steam generator. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memauki turbin untuk diekspansi secara *isentropic* dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari *steam* akan turun selama proses ini menuju keadan 4 steam akan masuk kondensor dan biasanya sudah berupa uap jenuh. Steam ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam condenser dan akan meninggalkan kondensor sebagai cair jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

2.2 Turbin Uap

2.2.1 Pengertian Umum Turbin Uap

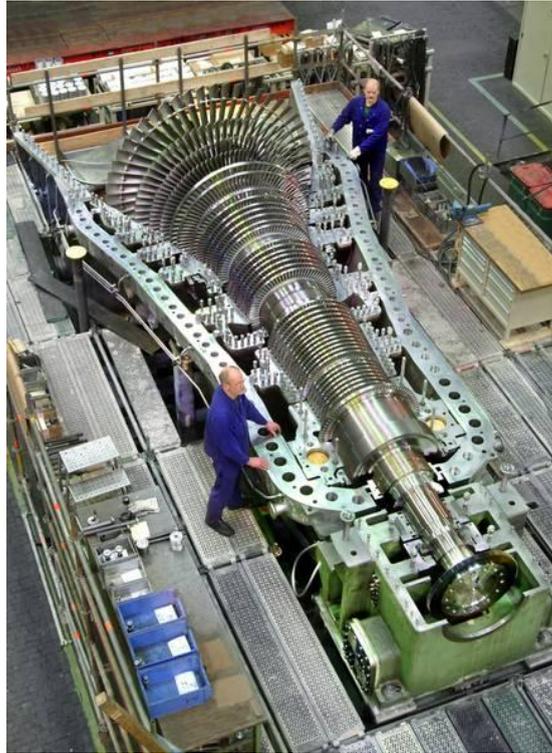
Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan. Tergantung pada jenis mekanisme yang digunakan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk transportasi. Pada proses perubahan energi potensial menjadi energi mekanisnya yaitu dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara.



Gambar 6. Turbin Uap

Pada dasarnya turbin uap terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen lainnya yang meliputi pendukungnya seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya agar kerja turbin dapat lebih baik. Sebuah turbin uap memanfaatkan energi kinetik dari fluida kerjanya yang bertambah akibat penambahan energi termal.

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin langsung atau dengan bantuan elemen lain, dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung dari jenis mekanisme yang digerakkan turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, seperti untuk pembangkit listrik.



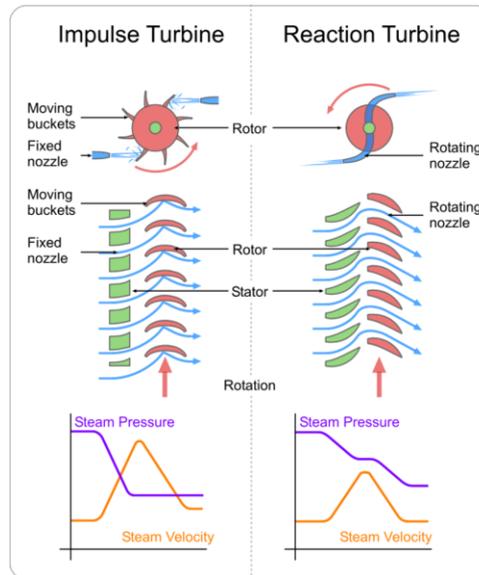
Gambar 7. Turbin Pada PLTU

Turbin uap digunakan sebagai penggerak mula PLTU, seperti untuk menggerakkan pompa, compressor dan lain-lain. Jika di bandingkan dengan penggerak generator listrik yang lain, turbin uap mempunyai kelebihan lain antara lain:

- Penggunaan panas yang lebih baik.
- Pengontrolan putaran yang lebih mudah
- Tidak menghasilkan loncatan bunga api listrik
- Uap bekasnya dapat digunakan kembali untuk proses.

Siklus yang terjadi pada turbin uap adalah siklus Rankine, yaitu berupa siklus tertutup, dimana uap bekas dari turbin di manfaatkan lagi dengan cara mendinginkannya kembali di kondensor, kemudian dialirkan lagi di pompa dan seterusnya sehingga merupakan siklus tertutup.

Secara umum turbin uap dapat digolongkan menjadi tiga macam yaitu turbin *impuls*, reaksi dan gabungan. Penggolongan ini berdasarkan cara mendapatkan perubahan energi potensial menjadi energi kinetik dari semburan uapnya.



Gambar 8. Turbin Impuls VS Turbin Reaksi

Adapun turbin impuls mengubah energi potensial uapnya menjadi energi kinetik didalam nosel (yang dibentuk oleh sudu-sudu diam yang berdekatan). Nosel diarahkan kepada sudu gerak. Didalam sudu-sudu gerak, energi kinetik diubah menjadi energi mekanis. Energi potensial uap berupa ekspansi uap, yang diperoleh dari perubahan tekanan awal hingga tekanan akhirnya di dalam sebuah nosel atau dalam satu grup nosel yang ditempatkan didepan sudu-sudu cakram yang berputar. Penurunan tekanan uap didalam nosel diikuti dengan penurunan kandungan kalornya yang terjadi didalam nosel. Hal ini menyebabkan naiknya kecepatan uap yang keluar dari nosel (energi kinetik). Kemudian energi kecepatan semburan uap yang keluar dari nosel yang diarahkan kepada sudu gerak (sudu-sudu cakram yang berputar) memberikan gaya impuls pada-pada sudu gerak sehingga menyebabkan sudu-sudu gerak berputar (melakukan kerja mekanis).

Atau bisa dipahami secara sederhana prinsip kerja dari turbin impuls yaitu turbin yang proses ekspansi lengkap uapnya hanya terjadi pada kanal diam (nosel) saja, dan energi kecepatan diubah menjadi kerja mekanis pada sudu-sudu turbin. Kecepatan uap yang keluar dari turbin jenis ini bisa mencapai 1200/detik. Turbin jenis ini pertama kali dibuat oleh de Laval, yang mana turbin ini mampu beroperasi pada putaran 30.000rpm. Pada aplikasinya turbin impuls ini dilengkapi dengan roda

gigi reduksi untuk memindahkan momen putar ke mekanisme yang akan digerakkan seperti generator listrik.

Turbin reaksi yaitu turbin yang ekspansi uapnya tidak hanya terjadi pada laluan-laluan sudu pengarah (nosel) yang tetap saja tetapi juga terjadi pada laluan sudu gerak (sudu-sudu cakram yang berputar), sehingga terjadi penurunan keseluruhan kandungan kalor pada semua tingkat sehingga terdistribusi secara seragam. Turbin yang jenis ini umumnya digunakan untuk kepentingan industri. Kecepatan uap yang mengalir pada turbin (yang biasanya nekatingkat) lebih rendah yaitu sekitar 100 – 200 m/detik.

2.2.2 Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap merupakan satu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang di gerakkan. Tergantung kepada mekanisme yang digerakkan, turbin uap di pakai dalam beberapa bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik, dan untuk transportasi. Dalam perancangan ini, turbin uap digunakan untuk menggerakkan generator tenaga listrik pada PLTU.

Turbin uap terdiri dari sebuah cakram yang dikelilingi oleh daun-daun cakram yang disebut sudu-sudu. Sudu-sudu ini berputar karena tiupan dari uap bertekanan yang berasal dari ketel uap, yang telah dipanasi terdahulu dengan menggunakan bahan bakar padat, cair dan gas.

Uap tersebut kemudian dibagi dengan menggunakan control valve yang akan dipakai untuk memutar turbin yang dikopelkan langsung dengan pompa dan juga sama halnya dikopel dengan sebuah generator sinkron untuk menghasilkan energi listrik.

Setelah melewati turbin uap, uap yang bertekanan dan bertemperatur tinggi tadi muncul menjadi uap bertekanan rendah. Panas yang sudah diserap oleh kondensor menyebabkan uap berubah menjadi air yang kemudian dipompakan kembali menuju boiler. Sisa panas dibuang oleh kondensor mencapai setengah

jumlah panas semula yang masuk. Hal ini mengakibatkan efisiensi termodinamika suatu turbin uap bernilai lebih kecil dari 50%. Turbin uap yang modern mempunyai temperatur boiler sekitar 5000 C sampai 6000 C dan temperatur kondensor 200 C sampai 300 C.

Untuk mengubah energi potensial uap menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara, sehingga secara umum turbin uap dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu: turbin uap impuls, reaksi dan gabungan (impuls-reaksi). Selama proses ekspansi uap di dalam turbin juga terjadi beberapa kerugian utama yang dikelompokkan menjadi dua jenis kerugian utama, yaitu kerugian dalam dan kerugian luar. Hal ini mengakibatkan terjadinya kehilangan energi, penurunan kecepatan dan penurunan efisiensi dari uap tersebut yang pada akhirnya akan mengurangi efisiensi siklus dan penurunan daya generator yang akan dihasilkan oleh generator listrik.

2.2.3 Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap dapat di klasifikasikan ke dalam kategori yang berbeda yang tergantung pada jumlah tingkat tekanan, arah aliran uap, proses penurunan kalor, kondisi-kondisi uap pada masuk turbin dan pemakaiannya di bidang industri. Adapun klasifikasinya antara lain:

1. Menurut jumlah tingkat tekanan, terdiri dari:
 - a) Turbin satu tingkat, atau satu atau lebih tingkat kecepatan, yaitu turbin yang biasanya berkapasitas kecil dan turbin ini kebanyakan dipakai untuk menggerakkan kompresor sentrifugal.
 - b) Turbin impuls dan reaksi nekatingkat, yaitu turbin yang dibuat dalam jangka kapasitas yang luas mulai dari yang kecil sampai yang besar.
2. Menurut arah aliran uap, terdiri dari:
 - a) Turbin aksial, yaitu turbin yang uapnya mengalir dalam arah yang sejajar terhadap sumbu turbin.
 - b) Turbin radial, yaitu turbin yang uapnya mengalir dalam arah yang tegak lurus terhadap sumbu turbin.

3. Menurut jumlah silinder, terdiri dari:

- a) Turbin silinder tunggal
- b) Turbin silinder ganda
- c) Turbin tiga silinder
- d) Turbin empat silinder

Turbin nekatingkat yang rotornya di pasang pada poros yang sama dan yang di kopel dengan generator tunggal di kenal dengan turbin poros nekatunggal ; turbin dengan poros yang terpisah untuk masing-masing silinder yang dipasang sejajar satu dengan yang lainnya dikenal dengan turbin neka-aksial.

4. Menurut metode pengaturan, terdiri dari:

- a) Turbin dengan pengaturan pengatur pencekikan (*throttling*), dalam hal ini uap panas lanjut yang keluar dari ketel masuk melalui satu atau lebih saluran pencekik yang di operasikan serempak.
- b) Turbin dengan pengaturan nozel yang uap segarnya masuk melalui dua atau lebih pengatur pembuka yang berurutan.
- c) Turbin dengan pengaturan langkah (*by-pass governing*), dimana uap panas lanjut yang keluar dari ketel disamping untuk dialirkan ke tingkat pertama juga langsung di alirkan ke satu, dua, atau bahkan tiga tingkat menengah turbin tersebut.
- d) Menurut prinsip aksi uap, terdiri dari:
 - a) Turbin impuls, yang energi potensial uapnya di ubah menjadi energi kinetic di dalam nozel atau laluan yang di bentuk oleh sudu-sudu yang berdekatan, dan di dalam sudu gerak, energi kinetik uap di ubah menjadi energi mekanis.
 - b) Turbin reaksi aksial yang ekspansi uapnya di antara laluan sudu, baik sudu pengarah maupun sudu gerak.
 - c) Turbin reaksi radial tanpa sudu pengarah yang diam.
 - d) Turbin reaksi radial dengan sudu pengarah yang diam

2.2.4 Komponen Utama Turbin Uap

Berikut adalah beberapa bagian-bagian penting dari turbin uap:

1) Sudu-sudu turbin

PLTU memiliki sudu-sudu turbin yang terdiri dari satu tingkat impuls dan 14 tingkat reaksi tekanan tinggi, 12 reaksi pada tekanan menengah, 2 x 8 reaksi pada turbin tekanan rendah.

2) Sudu tetap dan sudu jalan turbin

Uap yang berasal dari boiler dialirkan melalui nozzel. Karena adanya penyempitan pada aliran nozel, maka tekanan uap menurun dan kecepatannya bertambah. Sudu tetap mempunyai fungsi antara lain:

- a. Untuk mengubah energi potensial menjadi energi kinetik
- b. Untuk mengarahkan uap ke sudu jalan turbin

Nozzel pada sudu tetap dipasang pada casing dan fixed, sedangkan sudu jalan dipasang pada rotor turbin dan berputar jika dilalui uap. Sudu jalan berfungsi untuk mengubah energi kinetik uap menjadi energi mekanis. Jarak antara sudu-sudu jalan sangat kecil sekali kurang lebih 0,6 mikrometer.

3) Poros (*shaft*)

Poros merupakan salah satu bagian dari turbin yang menjadikan rotor-rotor berbagai tingkat turbin menjadi satu kesatuan. Poros ini juga mentransmisikan torsi rotor turbin untuk memutar bagian dari rotor generator listrik.

4) Rumah Turbin (Casing)

Casing berfungsi untuk melindungi proses ekspansi uap oleh turbin agar tidak terjadi kebocoran dari dan kearah luar.

5) Katup-katup pengatur beban

Katup pengatur beban pada turbin disebut juga *governor valve* yang mengatur jumlah aliran uap masuk ke turbin PLTU Semarang. Pembukaan dari tiap katup tergantung kebutuhan beban.

6) Bantalan aksial turbin

Aliran uap yang memutar turbin mengakibatkan turbin bergerak ke arah aksial (searah sumbu). Jika gerakan ke arah aksial ini melewati batas yang diizinkan, maka terjadilah gesekan antar rotor turbin dengan statornya. Jarak antara sudu tetap dan sudu jalan dibuat kecil sekali yang berguna untuk menghindari gesekan. Bantalan aksial ditempatkan pada bagian bantalan nomor 1 turbin (dekat dengan pedetsal) untuk memonitor gerakan ke arah aksial dan dilengkapi dengan minyak yang mengalir dan dipancarkan ke torak. Dengan bergeraknya torak ke arah aksial, maka tekanan minyak ini diteruskan ke rangkaian trip turbin. PLTU Semarang mempunyai batasan pada tekanan minyak 2,4 kg/cm² dan trip pada 5,6 kg/cm².

7) Bantalan turbin

Untuk menumpu rotor turbin dengan satu silinder casing diperlukan bantalan utama (main bearing) sebanyak dua buah, sedangkan pada turbin yang mempunyai lebih dari satu silinder casing bantalannya lebih dari dua buah.

Peralatan Bantu Turbin Uap

Peralatan bantu turbin merupakan serangkaian sistem yang mendukung operasi turbin agar dalam pengoperasiannya dapat berjalan dengan baik. Peralatan bantu turbin antara lain:

1. Sistem Pelumasan, fungsi sistem pelumasan turbin antara lain:
 - a) Mencegah korosi

- b) Mencegah keausan pada bagian turbin yang bergerak
- c) Sebagai pengangkut partikel kotor yang timbul karena gesekan
- d) Sebagai pendingin terhadap panas yang timbul akibat gesekan

2. Sistem perapat / *seal*

Sistem perapat digunakan untuk mencegah kebocoran uap dari dalam turbin ke udara luar atau sebaliknya melewati kelenjar-kelenjar perapat (*gland seal*) sepanjang poros turbin.

3. Sistem *turning gear*

Turning gear merupakan alat bantu turbin yang berfungsi mensukseskan operasi turbin pada saat start up dan shut down. Fungsi *turning gear* untuk menghindari melengkungnya poros turbin terutama pada saat temperatur poros masih tinggi, ketika turbin baru saja *shut down*. *Turning gear* digerakan oleh motor listrik AC yang memutar poros turbin 3 rpm. Dengan demikian terjadilah pendinginan yang merata untuk menghindari terjadinya *defleksi* (lendutan) poros.

4. Sistem *governor*

Governor adalah suatu alat pengatur putaran. Setiap turbin uap memerlukan *governor*, baik turbin yang digunakan untuk menggerakkan generator listrik, pompa air pengisi maupun menggerakkan *blower*. Tipe *governor* yang biasa digunakan yaitu elektronik dan hidrolik-mekanik.

5. Sistem proteksi

Sistem proteksi turbin merupakan serangkaian peralatan baik mekanis, hidrolis dan elektris yang dirancang mampu mengamankan operasi turbin dalam segala kondisi terburuk sekalipun.

6. *Condenser*

Condenser berfungsi untuk mengkondensasikan uap bekas menjadi uap air pengisi *boiler*, dimana uap bekas dari LP Turbin masuk ke kondensor melalui pipa-pipa kondensor yang di dalamnya berisi fluida kerja (biasanya berupa sea water atau fresh water).

Sistem Valve pada Turbin

Sistem *valve* pada turbin berfungsi mengatur laju aliran uap ke dalam turbin. Sistem *valve* digerakkan oleh *servo valve* actuator dan minyak hidrolis sebagai penggerak *valve*. *Valve* turbin terdiri dari:

1. MSV (*Main Stop Valve*)

MSV merupakan *valve* yang membuka dan menutup aliran uap utama (main steam) masuk ke HP Turbin. Pada saat start up, MSV berfungsi mengatur laju aliran uap yang masuk ke HP Turbin dan juga sebagai proteksi saat turbin trip.

2. GV (*Governor Valve*)

GV bekerja setelah terjadinya *valve transfer* dari MSV ke GV yang berfungsi mengatur laju aliran uap utama pada HP dan juga sebagai pengontrol beban (setelah disinkronisasi sampai beban normal).

3. RSV (*Reheat Stop Valve*)

RSV merupakan *valve* yang membuka dan menutup aliran uap reheat yang masuk ke IP Turbin. Pada saat start up RSV sudah dalam kondisi membuka penuh, jadi tidak berperan dalam pengaturan laju aliran uap reheat dan juga sebagai alat proteksi saat turbin trip.

4. ICV (*Interceptor Valve*)

Pada saat start up, ICV berperan seperti MSV yaitu mengatur aliran uap reheat pada IP Turbin.

Pengendalian Katup Uap Turbin

Salah satu hal yang juga sangat penting dalam pengontrolan turbin uap adalah pengaturan putarannya dengan mengatur prosentase buka tutup katup. Sistem katup uap (*governor valve*) pada dasarnya mempunyai fungsi sebagai berikut:

- a. Sebagai pengendali putaran turbin sebelum generator *on line*.
- b. Sebagai pengendali setelah generator sinkron dengan jaringan lokal dimana unit sebagai master (*island operator*)
- c. Sebagai pengendali beban yang dibangkitkan generator apabila generator sinkron dengan jaringan. Sistem pengatur ini bekerja berdasarkan *speed drop* yang telah ditentukan untuk mengatur frekuensi jaringan.
- d. Sebagai peralatan proteksi yang menjamin bekerjanya turbin dengan aman.
- e. Sebagai sarana pengaturan secara jarak jauh dari pusat pengukur beban.

Fungsi-fungsi trip yang telah kita bicarakan sebelumnya juga sangat berhubungan dengan governor ini karena ketika terjadi trip, governor-governor yang ada akan secara otomatis menutup laju uap yang menuju ke Turbin, sehingga turbin akan berhenti bekerja.

Mekanisme pengendalian buka tutup katup dapat dilakukan sebagai berikut:

1) Sistem pengendalian dengan *governor* motor

Pada sistem ini pengaturan pembukaan *governor valve* selain diperintah oleh tekanan minyak *governor* motor, juga dipengaruhi oleh putaran turbin (frekuensi). Hal ini dapat terjadi

karena tekanan minyak *governor* motor berhubungan dengan tekanan discharge impeller serta putaran turbin. Sistem pengaturan ini disebut juga *free governor action*. Karena pembukaan *governor* dipengaruhi oleh perubahan frekuensi. Tekanan minyak pada *governor* diatur oleh *servo motor* yang dikerjakan oleh operator dari *control room*.

2) Sistem pengendalian secara elektronik

Pada sistem ini pengaturan *governor* dilakukan secara hidrolik diperintahkan oleh suatu perangkat elektronik yang disebut *electro hydraulic converter*.

3) Sistem pengendalian dengan *load limit*

Pengaturan *governor load limit* adalah pengaturan pembukaan *governor* yang hanya dikontrol oleh tekanan minyak. *Load limit frekuensi* tidak bisa mempengaruhi pembukaan *governor valve*, kecuali jika terjadi tekanan frekuensi yang tinggi sehingga pengendalian minyak dari *governor motor* akan menurunkan tekanan minyak

2.3 Generator

2.3.1 Pengertian Umum Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Walau generator dan motor punya banyak kesamaan, tapi motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya. Hal ini bisa dianalogikan dengan sebuah pompa air, yang menciptakan aliran air tapi tidak menciptakan air di dalamnya. Sumber energi mekanik bisa berupa resiprokat maupun turbin mesin uap, air yang jatuh melalui sebuah turbin maupun kincir air, mesin pembakaran dalam, turbin angin, engkol tangan, energi surya atau matahari, udara yang dimampatkan, atau apa pun sumber energi mekanik yang lain.

2.3.2 Generator Sinkron 3 Fasa

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang diputar dengan penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut.

Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator ditunjukkan pada Persamaan dibawah ini:

$$f = \frac{n_2 \cdot P}{120}$$

dimana : f = Frekuensi listrik (Hz)

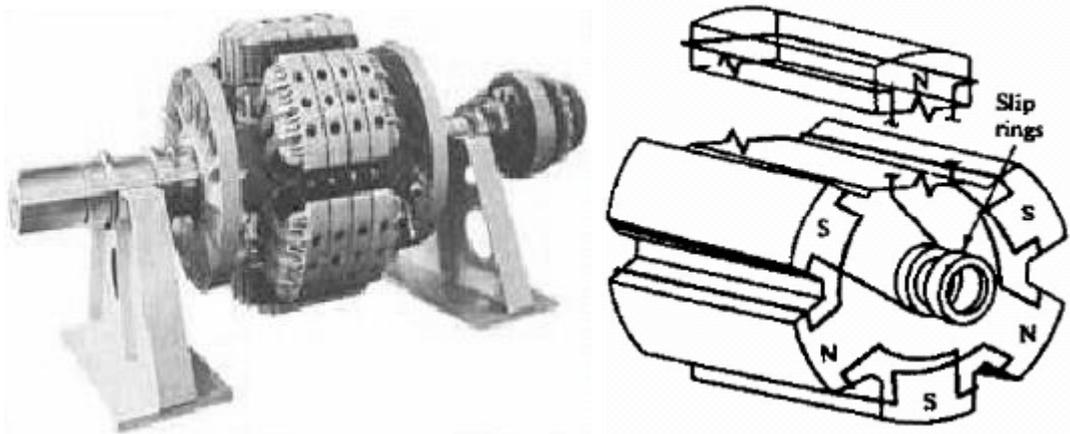
n_2 = Kecepatan putar medan magnet atau kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub

Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, kita mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut Generator Set atau generator cadangan.

2.3.3 Kontruksi Generator Sinkron 3 Fasa

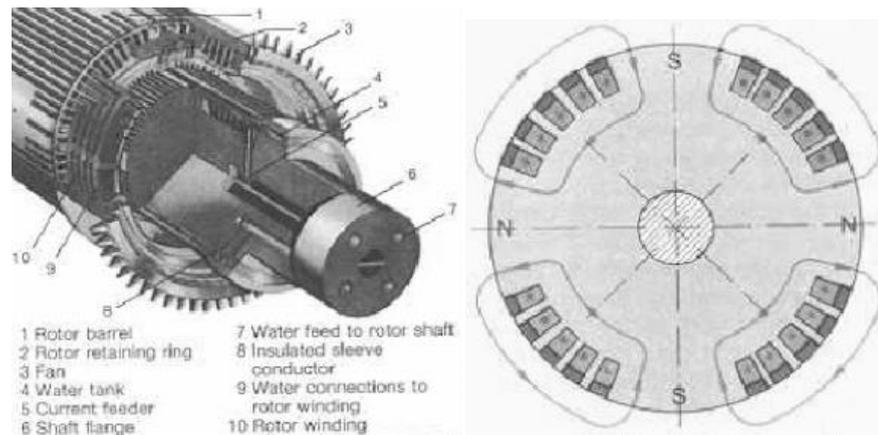
Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan mdan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient (kutub sepatu) dan dan non salient (rotor silinder). Gambaran bentuk kutup sepatu generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 9. *Rotor salient* (kutub sepatu) pada generator sinkron

Pada kutub *salient*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor sedangkan pada kutub *non salient*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor.

Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar *prime mover*, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10 MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 10. Gambaran bentuk (a) rotor *Non-salient* (rotor silinder), (b) penampang rotor pada generator sinkron

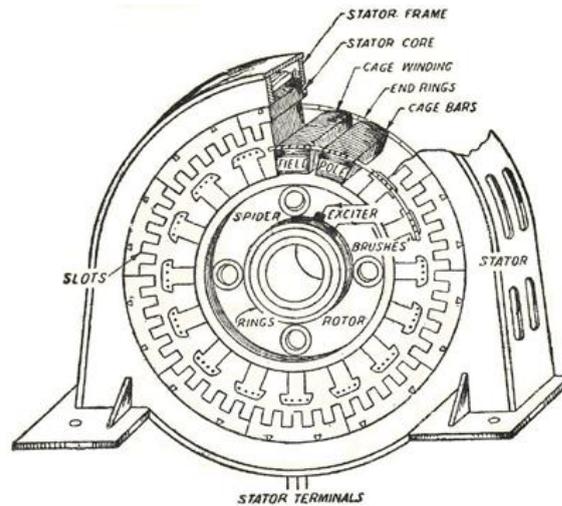
Arus DC disuplai ke rangkaian medan rotor dengan dua cara:

- a. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana *slip ring* dan sikat.
- b. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron.

2.3.4 Komponen Utama Generator Sinkron 3 Fasa

Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator.

Pada Gambar 11. dapat dilihat bentuk penampang sederhana dari sebuah generator sinkron.



Gambar 11. Konstruksi Generator Sinkron

Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar dimana diletakkan kumparan medan yang disuplai oleh arus searah dari *Eksiter*. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

1. Stator

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

a. Rangka Stator

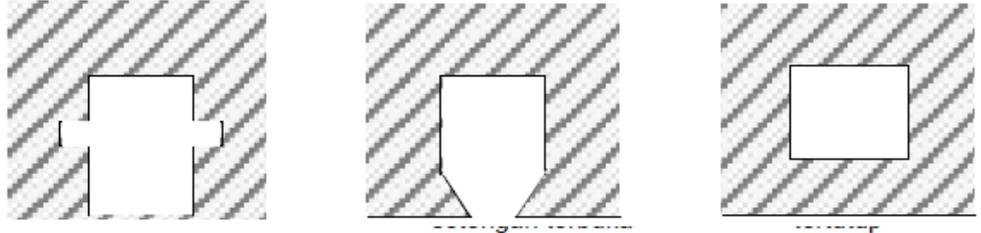
Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.

b. Inti Stator

Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator.

c. Alur (slot) dan Gigi

Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup. Ketiga bentuk alur (slot) tersebut tampak seperti pada Gambar 12. berikut :



Gambar 12. Bentuk-Bentuk Alur

d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

2. Rotor

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

a. *Slip Ring*

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

b. Kumparan Rotor (kumparan medan)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

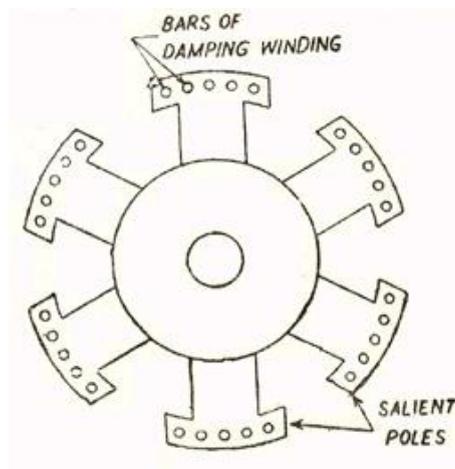
c. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient pole (kutub menonjol) dan non salient pole (kutub silinder).

a. Jenis Kutub Menonjol (Salient Pole)

Pada jenis *salient pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubung seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh Eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Bentuk kutub menonjol generator sinkron tampak seperti pada Gambar 2.3 berikut :



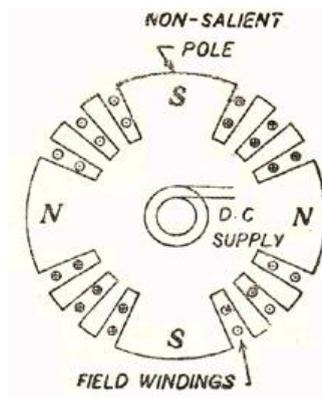
Gambar 13. Rotor Kutub Menonjol

Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena:

- Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

c. Jenis Kutub Silinder (*Non Salient Pole*)

Pada jenis *non salient pole*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh *Eksiter*. Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada Gambar 14 berikut :



Gambar 14. Rotor Kutub Silinder

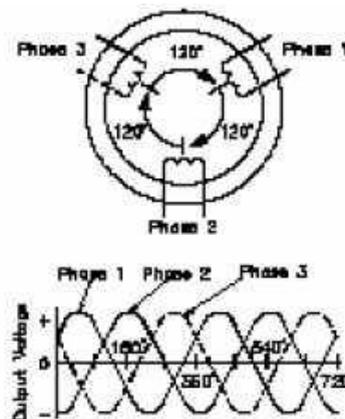
Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena :

- Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi
- Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2.3.5 Prinsip Kerja Generator Sinkron 3 Fasa

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 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 di set sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut 120° . Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3-fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 15. Gambaran sederhana kumparan 3-fasa dan tegangan yang dibangkitkan

Pada rotor kutub sepatu, *fluks* terdistribusi sinusoidal didapatkan dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Sedangkan pada rotor silinder, 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 tidak slip ring dan sikat karbon tidak begitu diperlukan.

2.3.6 Kecepatan Putar Generator Sinkron

Frekuensi listrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah:

$$f_e = \frac{n_r \cdot p}{120}$$

yang mana:

f_e = frekuensi listrik (Hz)

n_r = kecepatan putar rotor = kecepatan medan magnet (rpm)

p = jumlah kutub magnet

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor arus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.

2.3.7 Alternator tanpa beban

Dengan memutar alternator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (IF), maka tegangan (E_a) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut.

$$E_a = c.n.\phi$$

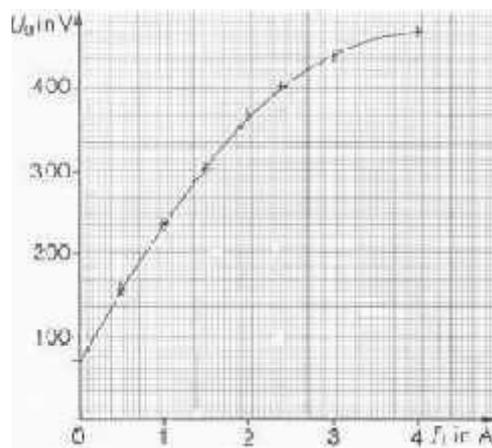
yang mana:

c = konstanta mesin

n = putaran sinkron

ϕ = fluks yang dihasilkan oleh IF

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (IF). Apabila arus medan (IF) diubah-ubah harganya, akan diperoleh harga E_a seperti yang terlihat pada kurva sebagai berikut.



Gambar 16. Karakteristik tanpa beban generator sinkron

2.3.8 Alternator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi (X_m). Reaktansi pemagnet (X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s). Persamaan tegangan pada generator adalah:

$$E_a = V + I.R_a + j I.X_s$$

$$X_s = X_m + X_a$$

yang mana:

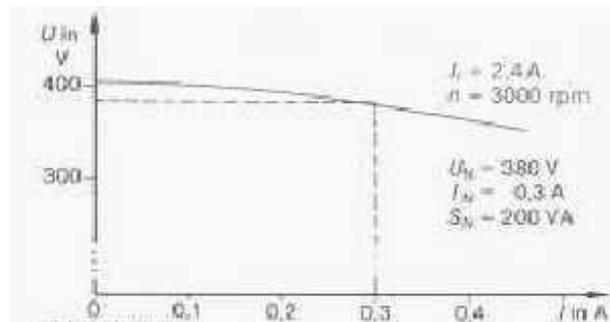
E_a = tegangan induksi pada jangkar

V = tegangan terminal output

R_a = resistansi jangkar

X_s = reaktansi sinkron

Karakteristik pembebanan dan diagram vektor dari alternator berbeban induktif (faktor kerja terbelakang) dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 17. Karakteristik alternator berbeban induktif

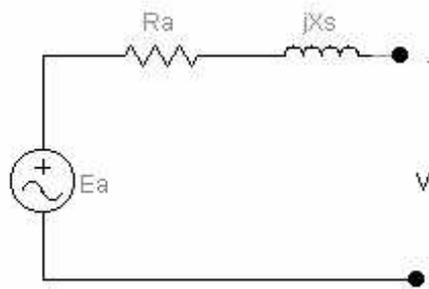
2.3.9 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Tegangan induksi E_a dibangkitkan pada fasa generator sinkron. Tegangan ini biasanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi sama dengan tegangan output terminal hanya ketika tidak ada arus

jangkar yang mengalir pada mesin. Beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal adalah:

1. Distorsi medan magnet pada celah udara oleh mengalirnya arus pada stator, disebut reaksi jangkar.
2. Induktansi sendiri kumparan jangkar.
3. Resistansi kumparan jangkar.
4. Efek permukaan rotor kutub sepatu.

Rangkaian ekuivalen generator sinkron perfasa ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

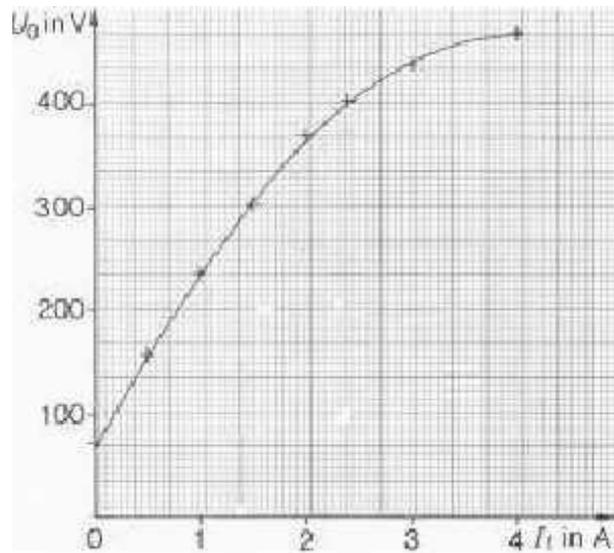


Gambar 18. Rangkaian ekuivalen generator sinkron perfasa

2.3.10 Menentukan Parameter Generator Sinkron

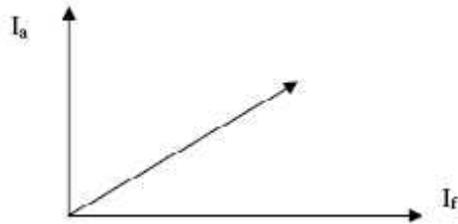
Harga $s X$ diperoleh dari dua macam percobaan yaitu percobaan tanpa beban dan percobaan hubungan singkat. Pada pengujian tanpa beban, generator diputar pada kecepatan ratingnya dan terminal generator tidak dihubungkan ke beban. Arus eksitasi medan mula adalah nol. Kemudian arus eksitasi medan dinaikan bertahap dan tegangan terminal generator diukur pada tiap tahapan. Dari percobaan tanpa beban arus jangkar adalah nol ($I_a = 0$) sehingga V sama dengan E_a . Sehingga dari pengujian ini diperoleh kurva E_a sebagai fungsi arus medan (I_f). Dari kurva ini harga yang akan dipakai adalah harga liniernya (*unsaturated*). Pemakaian harga linier yang

merupakan garis lurus cukup beralasan mengingat kelebihan arus medan pada keadaan jenuh sebenarnya dikompensasi oleh adanya reaksi jangkar.



Gambar 19. Karakteristik tanpa beban

Pengujian yang kedua yaitu pengujian hubung singkat. Pada pengujian ini mula-mula arus eksitasi medan dibuat nol, dan terminal generator dihubungkan singkat melalui amper meter. Kemudian arus jangkar I_a (= arus saluran) diukur dengan mengubah arus eksitasi medan. Dari pengujian hubung singkat akan menghasilkan hubungan antara arus jangkar (I_a) sebagai fungsi arus medan (I_f), dan ini merupakan garis lurus. Gambaran karakteristik hubung singkat alternator diberikan di bawah ini.



Gambar 20. Karakteristik hubung singkat alternator

Ketika terminal generator dihubungkan singkat maka tegangan terminal adalah nol. Impedansi internal mesin adalah:

$$Z_s = \frac{E_a}{I_a} = \sqrt{R_a^2 + X_s^2}$$

Oleh karena $X_s \gg R_a$, maka persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi:

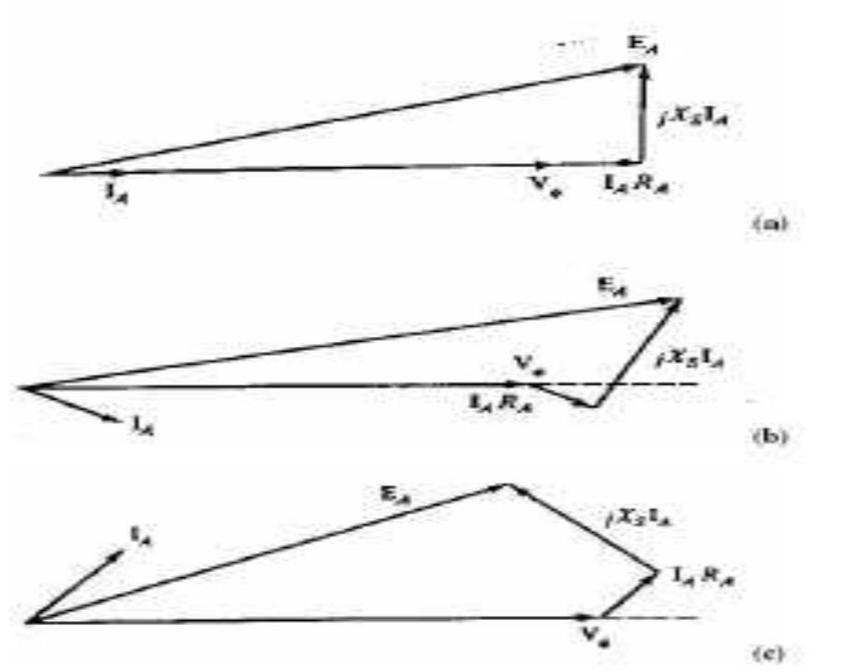
$$X_s = \frac{E_a}{I_a} = \frac{V_{DC}}{I_{a_{DC}}}$$

Jika I_a dan E_a diketahui untuk kondisi tertentu, maka nilai reaktansi sinkron dapat diketahui. Tahanan jangkar dapat diukur dengan menerapkan tegangan DC pada kumparan jangkar pada kondisi generator diam saat hubungan bintang (Y), kemudian arus yang mengalir diukur. Selanjutnya tahanan jangkar perfasa pada kumparan dapat diperoleh dengan menggunakan hukum ohm sebagai berikut.

$$R_a = \frac{V_{DC}}{2 \cdot I_{DC}}$$

Penggunaan tegangan DC ini adalah supaya reaktansi kumparan sama dengan nol pada saat pengukuran.

2.3.11 Diagram Fasor



Gambar 21. Diagram fasor (a) Faktor daya satu (b) faktor daya tertinggal (c) faktor daya mendahului

Diagram fasor memperlihatkan bahwa terjadinya perbedaan antara tegangan terminal V dalam keadaan berbeban dengan tegangan induksi (E_a) atau tegangan pada saat tidak berbeban. Diagram dipengaruhi selain oleh faktor kerja juga oleh besarnya arus jangkar (I_a) yang mengalir. Dengan memperhatikan perubahan tegangan V untuk faktor kerja yang berbeda-beda, karakteristik tegangan terminal V terhadap arus jangkar I_a diperlihatkan pada gambar 21.

2.3.12 Pengaturan Tegangan (Regulasi Tegangan)

Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal alternator antara keadaan beban nol (VNL) dengan beban penuh (VFL). Keadaan ini memberikan gambaran batasan *drop* tegangan yang terjadi pada generator, yang dinyatakan sebagai berikut.

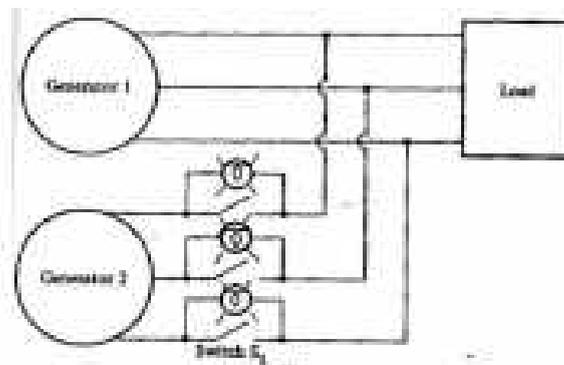
$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

2.3.13 Kerja Paralel Alternator

Untuk melayani beban yang berkembang, maka diperlukan tambahan sumber daya listrik. Agar sumber daya listrik yang baru (alternator baru) bisa digunakan bersama, maka dilakukan penggabungan alternator dengan cara mempararelkan dua atau lebih alternator pada sistem tenaga dengan maksud memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan pada sistem. Selain untuk tujuan di atas, kerja paralel juga sering dibutuhkan untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada mesin (alternator) yang harus dihentikan, misalnya untuk istirahat atau reparasi, maka alternator lain masih bisa bekerja untuk mensuplai beban yang lain. Untuk maksud mempararelkan ini, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yaitu:

1. Harga sesaat ggl kedua alternator harus sama dalam kebesarannya, dan bertentangan dalam arah, atau harga sesaat ggl alternator harus sama dalam kebesarannya dan bertentangan dalam arah dengan harga efektif tegangan jalajala.
2. Frekuensi kedua alternator atau frekuensi alternator dengan jala harus sama
3. Fasa kedua alternator harus sama
4. Urutan fasa kedua alternator harus sama

Bila sebuah generator 'G' akan diparaelkan dengan jala-jala, maka mula-mula G diputar oleh penggerak mula mendekati putaran sinkronnya, lalu penguatan IF diatur hingga tegangan terminal generator tersebut sama dengan jala-jala. Untuk mendekati frekuensi dan urutan fasa kedua tegangan (generator dan jala-jala) digunakan alat pendeteksi yang dapat berupa lampu sinkronoskop hubungan terang. Benar tidaknya hubungan paralel tadi, dapat dilihat dari lampu tersebut. Bentuk hubungan operasi paralel generator sinkron dengan lampu sinkronoskop diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 22. Operasi paralel generator sinkron

Jika rangkaian untuk paralel itu benar (urutan fasa sama) maka lampu L1, L2 dan L3 akan hidup-mati dengan frekuensi $f_L - f_G$ cycle. Sehingga apabila ke tiga lampu sedang tidak bekedip berarti $f_L = f_G$ atau frekuensi tegangan generator dan jala-jala sudah sama. Untuk mengetahui bahwa fasa kedua tegangan (generator dan jala-jala) sama dapat dilihat dari lampu L1, L2, dan L3. Frekuensi tegangan generator diatur oleh penggerak mula, sedang besar tegangan diatur oleh penguatan medan. Jika rangkaian untuk mempararelkan itu salah (urutan fasa tidak sama) maka lampu L1, L2 dan L3 akan hidup-mati bergantian dengan frekuensi $(f_L + f_G)$ cycle. Dalam hal ini dua buah fasa (sebarang) pada terminal generator harus kita pertukarkan.

Jika urutan fasa kedua sistem tegangan sama, maka lampu L1, L2, dan L3 akan hidup-mati bergantian dengan frekuensi $f_L - f_G$ cycle. Saat mempararelkan adalah pada keadaan L1 mati sedangkan L2 dan L3 menyala sama terang, dan keadaan ini berlangsung agak lama (yang berarti f_L dan f_G sudah sangat dekat atau benar-benar sama). Dalam keadaan ini, posisi semua fasa sistem tegangan jala-jala berimpit dengan semua fasa sistem tegangan generator.

2.4 *Heat Rate*

2.4.1 **Pengertian Umum**

Plant Heat Rate adalah metode perhitungan *performance* suatu pembangkit yang melibatkan parameter data dari sisi *boiler*, *turbine* dan generator. Nilai dari *plant heat rate* akan memberikan gambaran tentang seberapa besar efisiensi dari suatu pembangkit secara keseluruhan. Sehingga apabila suatu pembangkit mengalami penurunan efisiensi dibandingkan dengan kondisi *new and clean*, maka proses identifikasi letak penurunan efisiensi tersebut apakah dari sisi *boiler*, *turbine* ataukah generator akan lebih mudah terdeteksi melalui metode perhitungan ini. Metode perhitungan *plant heat rate* dibagi menjadi dua, yaitu :

1. **Metode Energi Input-Output**

Metode energi input-output merupakan metode sederhana untuk menentukan *performance* pembangkit melalui nilai *heat rate* karena hanya melibatkan sedikit parameter yaitu dari nilai kalor batubara, jumlah batubara yang masuk ke dalam boiler dan energi yang dibangkitkan. Metode ini secara umum digunakan oleh operator control room atau perencanaan dan pengendalian operasi untuk keperluan transaksi niaga pembelian energi listrik dengan kondisi normal operasi. Perhitungan *heat rate* dengan metode ini dapat dilakukan melalui persamaan sebagai berikut :

$$\text{Gross Plant Heat Rate} = \frac{\text{Jumlah Bahan Bakar} \times \text{Nilai Kalor HHV}}{\text{Generator Power Output}}$$

Sedangkan untuk menghitung *net plant heat rate* maka nilai dari generator *power output* dikurangi dengan pemakaian sendiri (*auxiliary power*), seperti pada persamaan berikut.

$$\mathbf{Net\ Plant\ Heat\ Rate} = \frac{\mathbf{Jumlah\ Bahan\ Bakar\ x\ Nilai\ Kalor\ HHV}}{\mathbf{Generator.\ Output\ -\ Auxiliary\ Power}}$$

1.4.2 Turbine Heat Rate (THR)

Performance dari sebuah turbine dapat diidentifikasi dari nilai turbine *heat rate*, yang diterjemahkan sebagai banyaknya kilo kalori energi yang dikonsumsi per kWh energi listrik saat dibangkitkan. Untuk menghitung turbine *heat rate* dapat menggunakan beberapa cara yaitu diantaranya dengan terlebih dahulu memahami heat balance (kesetimbangan panas) atau energi apa saja yang keluar dan masuk pada turbine kemudian membandingkannya dengan energi yang mampu dihasilkan oleh generator.

$$THR = \frac{Heat_{in} - Heat_{out}}{Generator_{out}}$$

Dimana,

THR = Turbine Heat Rate (kcal/kwh)

Heat_{in} = Energi panas yang masuk ke dalam turbine (kcal)

Heat_{out} = Energi panas yang keluar dari turbine (kcal)

Generator_{out} = Energi listrik yang dihasilkan oleh generator (kWh)

Berdasarkan persamaan di atas, apabila dijabarkan dengan melibatkan komponen parameter *flow steam*, *feed water* dan *spray water* berdasarkan *heat balance* maka *turbine heat rate* dapat dihitung dengan formula sebagai berikut :

Langkah – Langkah Perhitungan Turbin Heat Rate dan Efisiensi

1. Calculation Field Winding Loss

$$a. E_{WL} = (VF \times AF)/1000$$

Dimana,

E_{WL} = Field Winding Loss

V_F = Measured field (excitation) DC Voltage (V)

A_F = Measured field (excitation) DC Current (A)

2. Calculation Excitation transformer Loss

$$a. E_{TL} = (0,05 \times E_{WL}) + 1,888$$

Dimana,

E_{TL} = Excitation transformer Loss (ref. loss curve)

E_{WL} = Field Winding Loss

3. Calculation Excitation Power

$$a. K_{WE} = (VF \times AF)/1000 + E_{TL}$$

K_{WE} = Calculation Excitation Power (Kw)

E_{TL} = Excitation transformer Loss (ref. loss curve)

4. Calculation generator output

$$a. KW_I = KW_M - KW_E$$

Dimana,

KW_I = Field Winding Loss

KW_M = Measured generator terminal output (kW)

KW_E = Calculated excitation power (kW)

5. Calculation Gross Turbin Heat Rate

$$T_{HRM} = \frac{\{(G_{ms} \times h_{ms} + G_{ae} \times h_{ae} + G_{mu} \times h_{mu} + G_{gl} \times h_{gl}) - (G_{fw} \times h_{fw} + G_{ss} \times h_{ss})\}}{KW_1}$$

Dimana,

T_{HRM}	= Gross Turbine Heat Rate (kcal/kwh)
G_{ms}	= Main steam flow at turbine inlet (kg/h)
H_{ms}	= Main steam enthalpy at turbine inlet (kg/h)
G_{ae}	= Steam flow to ejector (kg/h)
G_{mu}	= Make up water flow (kg/h)
G_{gl}	= Steam flow to gland seal (kg/h)
H_{gl}	= Gland seal steam enthalpy (kcal/kg)
G_{fw}	= HP No.5 feedwater heater outlet feedwater flow (kJ/kg)
H_{fw}	= HP No.5 feedwater heater outlet feedwater enthalpy (kcal/kg)
G_{ss}	= SH spray flow (kg/h)
h_{ss}	= SH spray enthalpy (kcal/kg)
KW_1	= Power pada generator (kWh)

6. Efisiensi

a. $Eff = (1 / (0.001163 \times T_{HRM})) \times 100$

Dimana,

Eff	= Efisiensi
0.001163	= Koversi dari kcal ke kWh (Joule)

Berdasarkan persamaan di atas maka akan dapat diketahui berapa besar pengaruh dari parameter *flow* dan *enthalpi* terhadap peningkatan dan penurunan *heat rate* sehingga rencana perbaikan dapat dilakukan dengan baik dan efektif.

1.4.3 Generator Heat Rate (GHR)

Performance dari sebuah generator dapat diidentifikasi dari nilai generator *heat rate*, yang diterjemahkan sebagai banyaknya kilo kalori energi yang dikonsumsi per kWh energi listrik saat dibangkitkan. Untuk menghitung generator *heat rate* dapat menggunakan beberapa cara yaitu diantaranya dengan terlebih dahulu memahami *heat balance* (kesetimbangan panas) atau energi apa saja yang keluar dan masuk pada generator kemudian membandingkannya dengan energi yang mampu dihasilkan oleh generator, adapun persamaannya dapat dihitung dengan rumus dibawah ini :

$$NPHR = \frac{\text{Nilai Kalori} \times \text{Pemakaian Batu Bara}}{\text{Produksi kWh}}$$

Dimana ,

NPHR = Net Plant Heat Rate

Nilai Kalori = Nilai kalori yang terkandung di bahan bakar batu bara (5000)

Pemakaian BB = Pemakaian batu bara selama 1 hari 24 jam (Ton)

Produksi kWh = Total produksi daya 1 hari 24 jam (MWH)

Lalu menghitung nilai Efisiensi persamaannya dapat dihitung dengan rumus dibawah ini :

$$\text{Efisiensi} = \frac{1}{NPHR \times 1 \text{ Kcal} \times (1/1 \text{ Kwh})}$$

Efisiensi = Nilai Efisiensi Heat Rate pada generator

NPHR = Net Plant Heat Rate

1kCal = 4186,8 J

1kWh = 3,600,000 J