

## **BAB II**

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

#### **2.1 TINJAUAN PUSTAKA**

Andi Tegar Pratama (2017) melakukan penelitian tentang Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron Satu Fasa penelitian yang dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Cilacap. Dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan perubahan beban yang terjadi di PLTU Cilacap 2 x 300 MW tergantung dari permintaan PLN, dan rata-rata efisiensi generator di PLTU Cilacap sebesar 98% sebagai acuan PLN yaitu  $\pm 95\%$ .

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

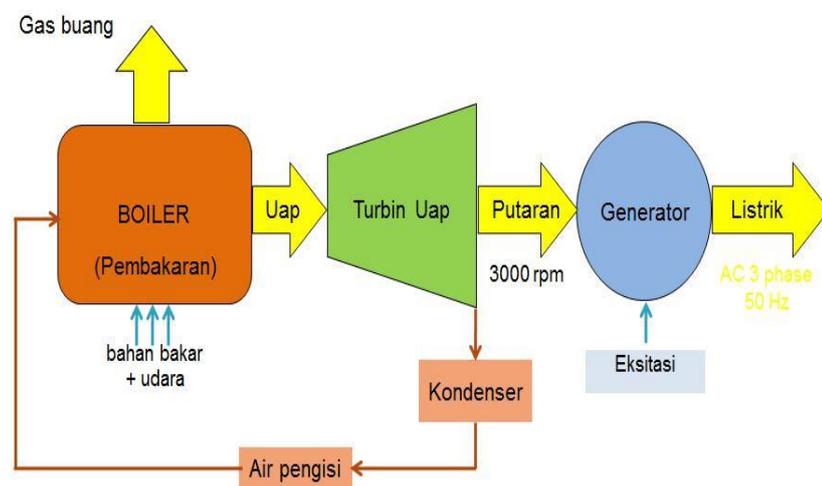
Cahyadi (2015) melakukan penelitian tentang analisa perhitungan efisiensi turbin dan generator QSFN – 300-2-20 B unit 10 dan 20 PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada Unit 10 nilai persentase efisiensi terendah terjadi yaitu sebesar 90.75%, sedangkan persentase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

## 2.2 DASAR TEORI

### 2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 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 (PLTU) menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu-bara dan minyak bakar serta MFO untuk *starter*.

PLTU memiliki beberapa komponen utama antara lain turbin uap, *boiler*, kondensor dan generator. Semua komponen tersebut terintegrasi menjadi satu kesatuan sistem unit yang bekerja untuk dapat menghasilkan energi listrik. Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada Gambar 2.1.



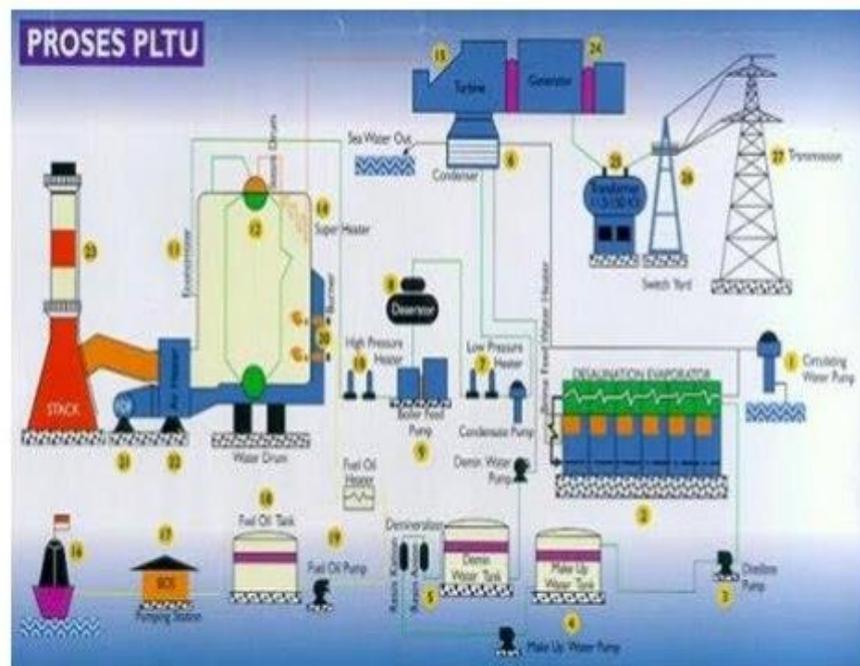
Gambar 2.1 Komponen-komponen PLTU

(Sumber: <https://www.matadunia.id/2016/10/prinsip-kerja-pltu-pembangkit-listrik.html>, 2016).

Kelebihan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (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 (*primemover*). Untuk menghasilkan uap, maka haruslah ada proses pembakaran untuk memanaskan air. PLTU merupakan suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang mengonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan proses sudu-sudu turbin yang dihubungkan dengan generator yang kemudian dibangkitkannya energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan akan menyuplai alat-alat yang disebut beban.

Berikut merupakan skema proses pembakaran Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU):



Gambar 2.2 Proses Pembakaran PLTU

(Sumber: <https://achmadjaelani89.wordpress.com/2016/09/13/pltu-pembangkit-listrik-tenaga-uap/>)

1. Langkah pertama ialah mengisi air ke *boiler* sampai seluruh permukaan pemindah panas penuh. Dan di dalam *boiler*, air tersebut akan mendapatkan panas dengan menyerap gas panas hasil dari

- pembakaran bahan bakar batubara, HSD serta udara sehingga menjadi uap dan uap tersebut dapat memutar turbin.
2. Langkah kedua ialah, uap yang dihasilkan dari *boiler* tersebut yang berupa uap yang bertekanan tinggi dengan temperatur tertentu maka selanjutnya akan diarahkan untuk memutar turbin HP (*High Pressure*), IP (*Intermediet Pressure*) dan LP (*Low Pressure*) sehingga menghasilkan energi mekanik yang berupa putaran.
  3. Kemudian generator akan di kopel langsung oleh turbin sehingga ketika turbin berputar maka akan menghasilkan energi listrik dari terminal *output* genertaor.
  4. Langkah ke empat, uap yang telah terpakai untuk memutar turbin tadi selanjutnya akan masuk ke kondensor untuk di dinginkan kembali dengan menggunakan air asin atau air laut yang di pompa menggunakan pompa CWP (*Circulation Water Pump*) agar berubah menjadi air melalui proses kondensasi. Air kondensat ini kemudian dipanaskan secara bertahap menggnakan pemanas (*heater*), menggunakan uap ekstraksi melalui LPH1, LPH2, Daerator, HPH4 dan HPH5. Air *demin* tersebut digunakan kembali sebagai air pengisi *boiler*. Dan setelah itu prosesnya kembali ke awal terus-menerus atau berulang-ulang.

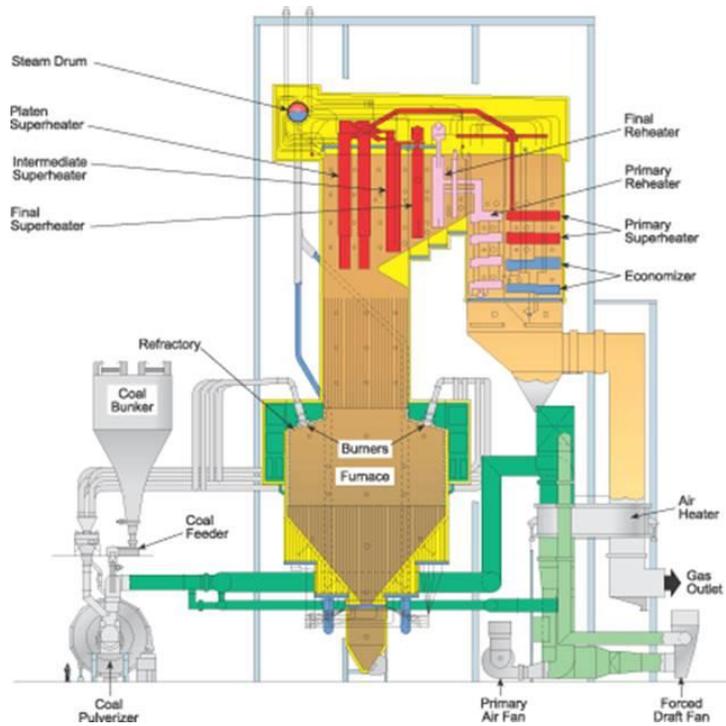
### **2.2.2 Proses Pembakaran Batu Bara**

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

Pada umumnya batubara digiling hingga menjadi serbuk ataupun butiran-butiran dengan diameter sesuai kebutuhan melalui mesin *pulverizer* dengan menggunakan *variable speed coal feeders controlled* untuk merespon penambahan beban. Batubara akan terbakar dengan mudah dan juga efisien seperti gas jika dibuat dalam bentuk serbuk atau diameter yang cukup kecil. Selain itu jika digunakan dalam bentuk serbuk, batubara akan mempunyai keuntungan-keuntungan yang mana antara lain:

1. Dapat digunakan batubara dengan segala macam ukuran.
2. Dapat melayani perubahan beban dengan baik.
3. Kebutuhan akan kelebihan udara pembakaran (*excess air*) rendah sehingga konsumsi daya untuk kipas lebih rendah.
4. Suhu pembakaran lebih tinggi.
5. Efisiensi *thermal* lebih baik sehingga menghasilkan biaya operasi dan biaya pemeliharaan yang cukup rendah.

Kemudian serbuk batubara tersebut didorong oleh udara primer menggunakan bantuan *primary air fan* (PA fan) sampai ke ruang pembakaran. Pembakar (*burner*) batubara serbuk menerima serbuk batubara kering dan udara primer kemudian mencampurnya dengan udara pembakaran utama dari *forced draft fan* (FD fan) sehingga dalam proses tersebut menghasilkan nyala api didalam tanur. Sistemnya dapat dilihat seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Proses Pembakaran BatuBara PLTU

(Sumber: <https://achmadarifin.com/prinsip-kerja-boiler-pada-pltu>)

Menyinggung poin 5 diatas. Untuk mendapatkan nilai *Efficiency Thermal* maka harus dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai *Efficiency GPHR (Gross Plant Heat Rate)* terlebih dahulu. *GPHR (Gross Plant Heat Rate)* atau laju panas yang masuk ke *Boiler*, laju panas yang masuk kedalam siklus uap tentu berbeda dengan laju panas yang masuk ke *Boiler*. Setiap *Boiler* memiliki nilai efisiensi sehingga tidak 100% panas yang masuk ke *Boiler* akan terserap kedalam siklus uap, sehingga jika dihitung secara *thermal* saja dari *Turbine Heat Rate* dalam menghitung bahan bakar yang dibutuhkan tentunya tidak akan cukup untuk menghasilkan daya (kW). Berikut rumus untuk menghitung *GPHR (Gross Plant Heat Rate)* :

(Agus, Adhi, N. 2014. “Analisa Pengaruh Kualitas Batubara Terhadap Biaya Pembangkitan (Studi Kasus Di PLTU Rembang)”. Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung.)

$$\text{Gross Plant Heat Rate (GPHR)} = \frac{\text{Turbine Heat Rate}}{\text{Efficiency Boiler}} = \text{kCAL/kWh} \quad (2.1)$$

Kemudian setelah nilai dari GPHR sudah diketahui langkah selanjutnya melakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai *Efficiency Thermal*. *Thermal* efisiensi merupakan suatu perhitungan yang menunjukkan kemampuan atau kondisi unit secara keseluruhan di dalam menghasilkan daya dan bahan bakar yang dipakai. Berikut rumus untuk menghitung efisiensi *Thermal* :

(Agus, Adhi, N. 2014. “Analisa Pengaruh Kualitas Batubara Terhadap Biaya Pembangkitan (Studi Kasus Di PLTU Rembang)”. Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung.)

$$\text{Thermal Efficiency Gross [100\%]} = \frac{860 \text{ kCal (Konversi:1 kWh)}}{\text{Turbine Heat Rate}} \times 100\% \quad (2.3)$$

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

#### 1. Mekanisme Pembakaran Batubara

Dalam pembakaran batubara, temperatur ruang bakar terlebih dahulu dikondisikan dalam keadaan panas, dengan temperatur melebihi temperatur nyala batubara dan suplai udara yang cukup. Kondisi ruang bakar dengan temperatur melebihi temperatur tinggi, memicu transfer kalor ke batubara sehingga temperatur batubara naik mencapai temperatur nyala. Kemudian, kandungan volatil dalam batubara akan muncul dan terbakar disekitar partikel batubara (proses *devolatilization*). Kandungan volatil akan keluar sampai habis, sehingga hanya tersisa kadar karbon. Pembakaran karbon terjadi secara relatif lebih lambat dan menghasilkan residu berupa abu (proses *char combustion*).

Borman (1998) menjelaskan secara lebih rinci mengenai proses pembakaran bahan bakar padat. Fenomena yang tidak dijelaskan oleh Howard dalam “*Fluidized Bed Combustion and Application*” dalam

proses *drying* bahan bakar padat, termasuk batubara. Dari kandungan air sebelum terjadinya *devolatilization*. Berikut adalah proses lengkap terjadinya reaksi pembakaran bahan bakar padat menurut Borman (1998).

a. Proses *Drying*

*Moisture* atau kadar air dalam bahan bakar padat termasuk batubara, memiliki 2 wujud. Yang pertama adalah kadar air yang berbeda dalam pori-pori partikel bahan bakar padat, dan sedangkan wujud yang kedua adalah kadar air terikat. Setelah masuk kedalam ruang bakar, pertukaran kalor antara bahan bakar.

Dalam pembakaran, kehadiran *moisture* dalam bahan bakar memperlambat proses transfer massa dan kalor yang terjadi (*burning rate*)

b. Proses *Devolatilization*

*Devolatilization* bahan bakar dimulai dengan pelepasan zat volatil meninggalkan bahan bakar zat. Zat volatil keluar melalui pori-pori partikel, menghalangi oksigen dari luar masuk kedalam partikel dan kemudian terbakar disekitar partikel bahan bakar. api yang terbentuk disekitar partikel, meningkatkan temperatur partikel, mengakibatkan terjadinya *devolatilization* lanjut. Proses *devolatilization* terjadi tergantung pada jenis bahan bakar dan temperatur. Sebagai contoh, pada batubara jenis lignit, pelepasan zat volatil mulai terjadi pada 300-400°C. Zat volatil terbakar pada 400-600 °C. Zat volatil terus dilepas sampai 700-900 °C, yang mana zat yang dikeluarkan adalah karbon monoksida, karbon dioksida, air, uap hidrokarbon, tar, dan hidrogen. Di atas 900 °C, proses *devolatilization* telah selesai dan kandungan bahan bakar yang tersisa adalah *char* dan abu.

c. *Char Combustion*

Tahap terakhir pada pembakaran bahan bakar padat adalah *char combustion*. *Char*, yang merupakan residu dari proses

sebelumnya, memiliki porositas yang tinggi. Contohnya ialah, porositas sekitar 0,7. Ketika 0,9 atau 0,9% *voids*, sementara batubara memiliki sekitar 0,7. Ketika zat volatil berhenti keluar dari *char*, oksigen dapat masuk kedalam pori-pori partikel *char*, mengijinkan terjadinya pembakaran atau reaksi antara *char* dan oksigen.

Secara prinsip, kecepatan pembakaran *char* tergantung antara reaksi *char* dan oksigen pada permukaan *char* dan kecepatan difusi oksigen kedalam *char*. Lebih detail, pengaruh terhadap kecepatan pembakaran *char* dipengaruhi oleh parameter konsentrasi oksigen, temperatur gas, bilangan *reynolds*, ukuran *char* dan porositas *char*.

### 2.2.3 Siklus Rankine

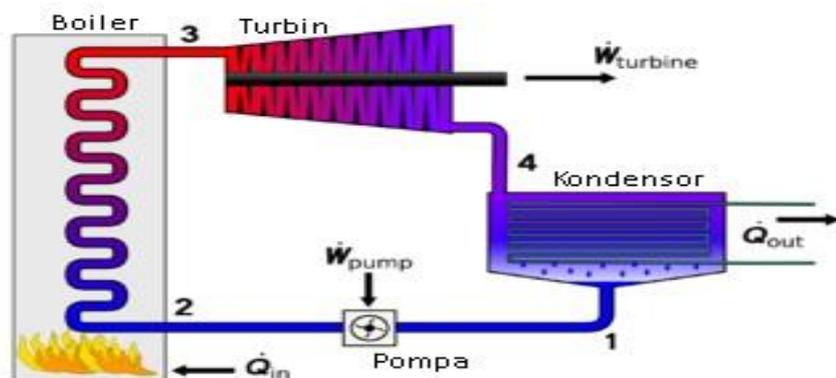
Siklus Rankine adalah siklus yang mengkonversikan energi panas menjadi kinetik, dan menjadi siklus standar dalam pembangkit energi tenaga uap (*steam power plants*). Siklus Rankine ini dinamai untuk mengenang ilmuan Skotlandia, siklus rankine ini ditemukan oleh William John Maquorn Rankine, seorang profesor dalam bidang teknik sipil Universitas Glasgow. Ia merupakan orang pertama yang menyusun naskah formal dalam bidang tersebut. Setelah ditemukan, siklus rankine tersebut segera diterima sebagai standar untuk pembangkit daya yang menggunakan uap (*steam*). Siklus rankine ini merupakan pengubahan panas menjadi kerja. Panas tersebut disuplai dari luar menuju siklus aliran tertutup dan biasanya menggunakan air sebagai fluida kerja (fluida yang dipanaskan/didinginkan). Siklus ini menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan di seluruh dunia.

Siklus Rankine adalah model operasi mesin uap yang secara umum digunakan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Sumber panas untuk siklus rankine dapat berasal dari batubara, gas alam, minyak

bumi, nuklir, bio masa dan panas matahari. Dalam siklus rankine terdapat empat proses sebagai berikut:

1. Proses 1-2: Fluida kerja (misalnya air) dipompa dari tekanan rendah menjadi tekanan tinggi. Pada tahap ini fluida kerja berfase cair sehingga hanya membutuhkan energi yang relatif kecil untuk proses pemompaan.
2. Proses 2-3: Air bertekanan tinggi memasuki *boiler* untuk dipanaskan. Di sini air berubah fase menjadi uap jenuh. Proses ini berlangsung pada tekanan konstan.
3. Proses 3-4: Uap jenuh berekspansi pada turbin sehingga menghasilkan kerja berupa putaran turbin. Proses ini menyebabkan penurunan temperature dan tekanan uap, sehingga pada suhu turbin tingkat akhir kondensasi titik air mulai terjadi.
4. Proses 4-1: Uap basah memasuki kondensor dan didinginkan sehingga semua uap berubah menjadi fase cair. Air dipompakan kembali (Proses 1-2).

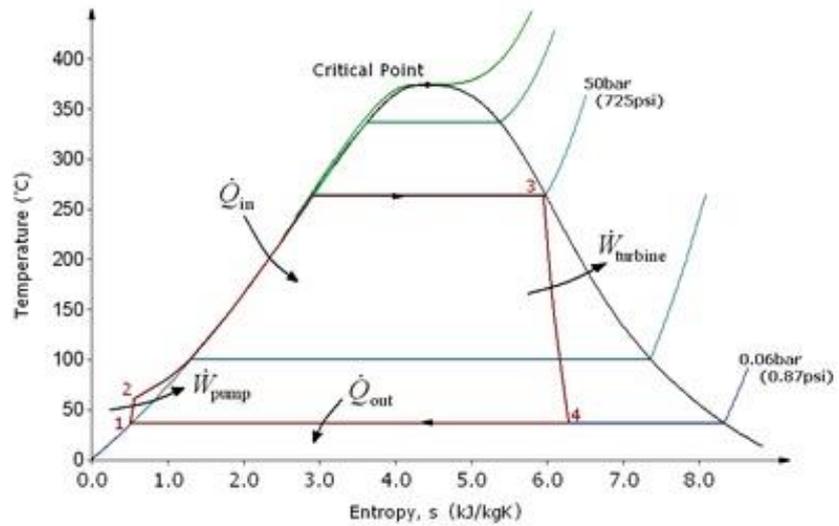
Besarnya kerja dibutuhkan pompa, panas yang diberikan *boiler*, kerja yang dihasilkan turbin dan panas yang dibuang pada kondensor dapat diperhitungkan dengan bantuan tabel *Enthalpy-entropy* air-uap air.



Gambar 2.4 Proses Siklus Rankine

(Sumber: <http://januaradi.blogspot.com/2011/07/siklus-rankine-pltu.html>, 2011)

Contoh diagram siklus rankine :

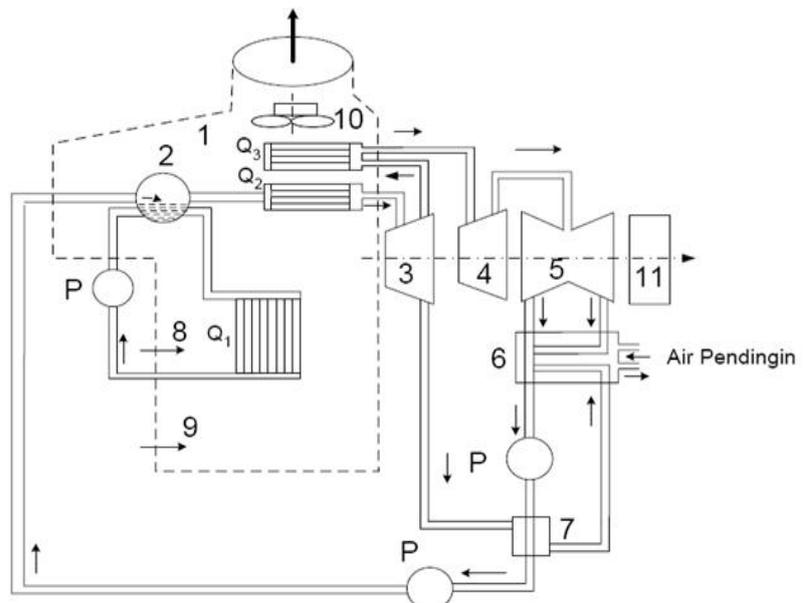


Gambar 2.5 T-s Diagram Siklus Rankine

(Sumber: Novianti S.J, 2015)

### 2.2.4 Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) terdapat komponen utama dan juga komponen atau peralatan penunjang. Bagian utama yang terdapat pada sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) antara lain:



Gambar 2.6 Komponen Utama PLTU

(Sumber: Adi Apri S, 2009)

Keterangan gambar:

1. *Boiler* P :Pompa
2. Drum Q1 :Pipa-pipa
3. Turbin Tekanan Tinggi Q2 :Superhiter
4. Turbin Tekanan Rendah Q3 :Pemanas Ulang
5. Turbin Tekanan Rendah
6. Kondensor
7. Pemansan Awal
8. Pembakaran Bahan Bakar
9. Kipas Udara Masuk
10. Kipas Gas Buang
11. Generator

Penjelasan dari gambar 2.6 diatas ialah. *Boiler* bekerja sebagai tungku, memindahkan panas yang berasal dari bahan bakar kepada barisan pipa-pipa air yang mengelilingi api. Kemudian air harus senantiasa berada dalam keadaan mengalir walaupun dilakukan dengan menggunakan pompa.

Air tersebut kemudian dipanaskan dengan cara menggunakan bahan bakar batubara sehingga terbentuklah uap yang bertekanan dengan temperatur suhu yang tinggi. Uap tersebut kemudian mengalir ke turbin bertekanan tinggi setelah melewati superheater dimana gunanya untuk meningkatkan suhu uap sampai dengan kira-kira 500°C – 600°C, kemudian uap akan menjadi kering dan efisiensi seluruh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) meningkat.

Turbin tekanan tinggi merubah energi *thermal* menjadi energi mekanik dengan mengembangnya uap yang melewati sudu-sudu turbin. Dimana dalam hal tersebut secara otomatis uap akan mengalami penurunan nilai temperatur dan tekanan. Agar meningkatkan efisiensi *thermal* dan juga untuk menghindari terjadinya kondensasi terlalu dini, maka uap tersebut dilewatkan menuju sebuah pemanas ulang yang terdiri atas barisan pipa-pipa yang dipanaskan.

Uap yang telah meninggalkan pemanas ulang maka akan menuju ke turbin tekanan menengah. Turbin tekanan menengah ini memiliki ukuran yang lebih besar daripada turbin tekanan tinggi. Kenapa demikian, semua itu karena dengan menurunnya nilai tekanan uap, maka volume menjadi naik. Kemudian uap menuju turbin tekanan rendah, dimana turbin tekanan rendah ini memiliki ukuran yang lebih besar. Dan setelah itu uap akan menuju kondensor. Dimana uap yang telah memasuki kondensor maka akan didinginkan menggunakan air pendingin, sehingga disitulah terjadi kondensasi. Air pendingin biasanya berasal dari air laut, sungai atau juga bisa berasal dari danau terdekat, atau posisinya yang paling dekat. Proses kondensasi ini menyebabkan terjadinya pakem yang diperlukan guna untuk meningkatkan efisiensi turbin. Air hangat keluaran dari kondensor dipompakan ke sebuah pemanas awal memperoleh energi *thermal* dari uap yang diambil dari turbin bertekanan tinggi.

Komponen atau peralatan penunjang pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) antara lain:

1. *Desalination Plant* (Unit Desal)

Fungsi dari peralatan ialah mengubah air laut (*brine*) menjadi air tawar (*fresh water*) dengan metode penyulingan. Air laut bersifat korosif, bila dibiarkan langsung masuk ke dalam unit utama akan dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan PLTU lainnya.

2. *Reverse Osmosis* (RO)

Fungsinya sama dengan *desalination plant*, hanya saja memakai metode yang berbeda. Membran semi *permeable* yang digunakan dapat menyaring garam yang terkandung pada air laut sehingga air tawar dapat dihasilkan seperti pada *desalination plant*.

3. *Pre Treatment*

Biasanya terdapat pada unit yang menggunakan pendingin air tanah/sungai. Fungsinya untuk menghilangkan endapan, kotoran, dan mineral yang terkandung pada air tersebut.

#### 4. *Demineralizer Plant* (Unit Demin)

Alat ini berfungsi untuk menghilangkan kadar mineral (ion) yang ada dalam kandungan air tawar. Air merupakan fluida kerja PLTU, jadi harus bebas dari mineral, sebab bila air yang digunakan masih menggunakan mineral berarti konduktivitasnya masih tinggi dan dapat menyebabkan terjadinya GGL induksi ketika melewati jalur perpipaan dalam bagian PLTU sehingga dapat menimbulkan korosi pada peralatan tersebut.

#### 5. *Hidrogen Plant* (Unit Hidrogen)

Fungsi dari alat ini ialah sebagai pendingin generator pada bagian utama PLTU.

#### 6. *Chlorination Plant* (Unit Chlorin)

Fungsi dari alat ini ialah menghasilkan senyawa natrium hipoclorit (NaOCl) yang dipakai untuk melemahkan mikroorganisme laut pada area *water intake*. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya pengerasan (*scaling*) pada pipa-pipa kondensor dan unit desal akibat aktivitas mikroorganisme laut tersebut.

#### 7. *Auxiliary Boiler* (*Boiler* Bantu)

Pada umumnya ialah *boiler* berbahan bakar minyak (*fuel oil*) yang fungsinya ialah menghasilkan uap (*steam*) yang digunakan ketika *boiler* utama *start up* maupun sebagai uap bantu (*auxiliary steam*).

#### 8. *Coal Handling* (Unit Pelayanan Batubara)

Bagian ini merupakan unit yang melayani pengolahan batubara mulai dari proses bongkar muat kapal (*ship unloading*) di dermaga, distribusi ke *stock area* hingga penyaluran ke bunker unit.

#### 9. *Ash Handling* (Unit Pelayanan Abu)

Bagian ini adalah unit yang melayani pengolahan abu baik itu abu jatuh (*bottom ash*) maupun abu terbang (*fly ash*) dari *Electrostatic Precipitator hopper* dan *Submerged Drag Chain*

*Conveyor* (SDCC) pada unit utama hingga ke tempat penampungan abu (*ash valley*).

Gangguan atau *malfunction* yang terjadi pada salah satu bagian komponen utama akan dapat menyebabkan terganggunya seluruh sistem pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Oleh sebab itu, masing-masing komponen utama dan peralatan penunjang dilengkapi dengan sistem dan alat bantu yang mendukung kinerja dari komponen tersebut.

### **2.2.5 Boiler (Katel Uap)**

*Boiler* merupakan mesin kalor (*thermal engineering*) yang mentransfer energi-energi kimia atau energi otomis menjadi kerja (usaha). *Boiler* atau ketel uap adalah suatu alat yang berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan uap (*steam*). Uap diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. *Boiler* mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

*Boiler* merupakan suatu alat pengkonversi energi yang berbentuk bejana tertutup. Dimana energi yang dikonversikan tersebut merupakan energi reaksi kimia dari bahan bakar dengan oksigen menjadi energi panas, dimana energi panas tersebut digunakan untuk memanaskan air (*feed water*) hingga air berubah fasa menjadi uap.

Prinsip kerja *boiler* sendiri yaitu mengonversikan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran antara bahan bakar dengan udara, dari air menjadi uap dengan temperatur dan tekanan yang tinggi. Pembakaran merupakan reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dengan udara, dimana dalam bahan bakar tersebut terkandung bahan-bahan yang mudah terbakar dengan udara yang mengakibatkan terlepasnya energi yang terkandung oleh bahan bakar dan berubah menjadi energi *thermal*. Sisa dari pembakaran adalah gas buang yang

temperaturnya masih lumayan cukup tinggi, energi panas hasil pembakaran di dalam *boiler* tersebut akan merambat secara konduksi, konveksi dan radiasi, melalui dinding.

*Boiler* berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang dimana mengonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas. *Boiler* terdiri dari dua komponen utama, yaitu:

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

Adapun rumus untuk menghitung *Efficiency Boiler* sebagai berikut :

(Sudarto, Y. 1999. "Kajian Teoritik Perhitungan Efisiensi PLTU Unit I Kapasitas 400 MW Di Paiton". Fakultas Teknik, Universitas Kristen Petra Surabaya)

[Aliran *Main Steam Flow* [*Enthalpy Main Steam Flow – Enthalpy Final Feed Water*] + Aliran *S/H Spray Water* [*Enthalpy Main Steam Flow – Enthalpy S/H Spray Water*]+ Aliran *Hot Reheater* [*Enthalpy Hot Reheater – Enthalpy Cold Reheater*] + Aliran *Reheater Spray* [*Enthalpy Cold Reheater – Enthalpy Reheater Spray*]]/[Nilai Kalor x Batu Bara].

Cara menghitungnya ialah sebagai berikut :

1. Aliran *Main Steam Flow* x [*Enthalpy Main Steam Flow – Enthalpy Final Feed Water*]=
2. Aliran *S/H Spray Water* x [*Enthalpy Main Steam Flow – Enthalpy S/H Spray Water*]=
3. Aliran *Hot Reheater* x [*Enthalpy Hot Reheater – Enthalpy Cold Reheater*]=

Hasil dari perhitungan diatas kemudian dijumlahkan :

$$[ [1] + [2] + [3] ] =$$

Kemudian untuk perhitungan akhir untuk mendapatkan nilai efisiensi dari *Boiler* sebagai berikut :

$$\frac{\text{Nilai Efficiency Boiler}}{\text{Nilai Kalor x Kebutuhan Batu Bara}} = \text{kCal/kWh} \quad (2.3)$$

### 2.2.6 Turbin Uap

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

Uap yang telah melakukan kerja di turbin tekanan maka temperatur turun hingga kondisinya menjadi uap basah. Uap keluar turbin ini kemudian dialirkan kedalam kondensor untuk dikondensasikan atau didinginkan kembali agar menjadi air kondensat, sedangkan energi mekanik yang dihasilkan digunakan untuk memutar generator. Berikut adalah jenis-jenis turbin uap:

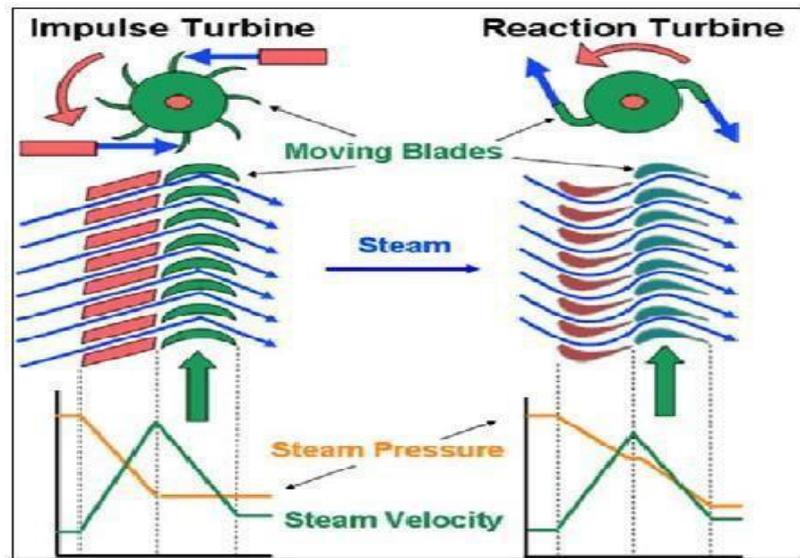
1. Turbin *Impuls* (Aksi)

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

2. Turbin Reaksi

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

Gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan karakteristik turbin uap dan juga jenisnya.



Gambar 2.7 Jenis Turbin dan Karakteristiknya

(Sumber: <http://engineeringrelatednotes.blogspot.com/2016/10/steam-turbine.html>)

*Turbine Heat Rate* adalah banyaknya kalor (kCal) yang dibutuhkan siklus turbin didalam sistem untuk membangkitkan daya sebesar 1 kWh, satuannya adalah kCal/kWh. rumus untuk perhitungan *Turbine Heat Rate* (T.HR) ialah sebagai berikut :

(Jamaludin, I.K. 2014. "Analisis Perhitungan Daya Turbin Yang Dihasilkan Dan Efisiensi Turbin Uap Pada Unit 1 Dan Unit 2 Di PT. Indonesia Power Uboh UJP, Banten 3 Lontar". Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Tangerang.)

$$T.HR = \frac{\{(Msf.h1) - (FFwf.h2) + (HRhf.h3) - (CRhf.h4) + (AuxSf.h5) - (SHSpf.h6)\}}{PG}$$

Dimana :

Msf = *Main Steam Flow*

FFwf = *Final Feed water Flow*

HRhf = *Hot Reheater Flow*

CRhf = *Cold Reheater Flow*

AuxSf = *Auxiliary Steam Flow*

SHSpf = *Superheater Spray Water Flow*

PG = *Generators Output*

h1 = *Enthalpy Main Steam Flow*

- h2 = *Enthalpy Final Feed Water Flow*
- h3 = *Enthalpy Hot Reheater*
- h4 = *Enthalpy Cold Reheater Flow*
- h5 = *Enthalpy Auxiliary Steam Flow*
- h6 = *Enthalpy Superheater Spray Flow*

Besarnya *Cold Reheat (CRhf) Flow* didapat dari :

$$CRhf = G_{MS} - G_{SLH} - G_{SSL} - G_{DL1} - G_{GRS} - G_{EX7}$$

Dimana :

- G<sub>MS</sub> = *Main Steam Flow*
- G<sub>SLH</sub> = *Governor Valve HP Steam Leak*
- G<sub>SSL</sub> = *Governor Valve LP Steam Leak*
- G<sub>DL1</sub> = *Dummy Leak 1*
- G<sub>GRS</sub> = *Gland Reg. Sup. Steam*
- G<sub>EX7</sub> = *No. 7 Extraction Flow*

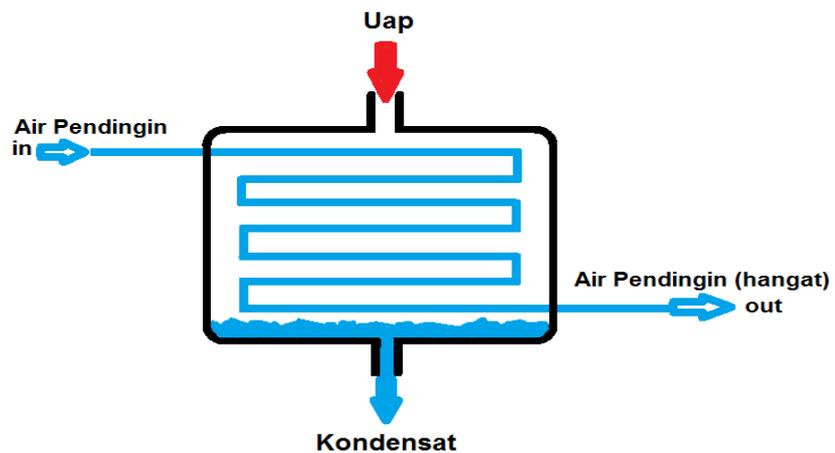
Untuk perhitungan akhir untuk mendapatkan nilai dari *Efficiency Turbine Heat Rate* ialah sebagai berikut :

$$\frac{\text{Nilai Turbine Heat Rate}}{\text{Nilai Aktual Beban}} = kCal/kWh. \quad (2.4)$$

### 2.2.7 Kondensor

Kondensor merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Prinsip kerja kondensor ialah proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (*Tubes*). Uap mengalir diluar pipa-pipa (*Shell Side*) sedangkan air sebagai pendingin mengalir didalam pipa-pipa (*Tube Side*). Kondensor seperti ini disebut kondensor tipe *surface* (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondensor sangat besar sehingga dalam perencanaan biasanya sudah diperhitungkan. Biasanya air pendingin diambil dari sumber yang cukup persediaannya, seperti laut, danau dan sungai. Posisi kondensor umumnya terletak dibawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondensor karena gravitasi.

Kondensor adalah suatu alat yang terdiri dari jaringan pipa dan digunakan untuk mengubah uap menjadi zat cair (air). dapat juga diartikan sebagai alat penukar kalor (panas) yang berfungsi untuk mengkondensasikan fluida.



Gambar 2.8 Cara Kerja Kondensor  
(Sumber: [Revsangmane.blogspot.com](http://Revsangmane.blogspot.com))

Secara umum terdapat dua jenis kondensor yaitu *surface condenser* dan *direct contact condenser*. Berikut klasifikasi kedua jenis kondensor tersebut:

#### 1. *Surface Condenser*

Cara kerja dari jenis alat ini ialah proses perubahan dilakukan dengan cara mengalirkan uap kedalam ruangan yang berisi susunan pipa dan uap tersebut akan memenuhi permukaan luar pipa sedangkan air yang berfungsi sebagai pendingin akan mengalir di dalam pipa (*tube side*), maka akan terjadi kontak antara keduanya dimana uap yang memiliki temperatur panas akan bersinggungan dengan air pendingin yang berfungsi untuk menyerap kalor dari uap tersebut, sehingga temperatur uap (*steam*) akan turun dan terkondensasi. *Surface condenser* terdiri dari dua jenis yang

dibedakan oleh cara masuknya uap dan air pendingin, berikut jenis-jenisnya:

*a. Type Horizontal Condenser*

Pada type kondensor ini, air pendingin masuk melalui bagian bawah, kemudian masuk kedalam pipa (*tube*) dan akan keluar pada bagian atas, sedangkan uap akan masuk pada bagian tengah kondensor dan akan keluar sebagai kondensat pada bagian bawah.

*b. Type Vertical condenser*

Pada jenis kondensor ini, tempat masuknya air pendingin melalui bagian bawah dan akan mengalir di dalam pipa (*tube*) selanjutnya akan keluar pada bagian atas kondensor, sedangkan uap (*steam*) akan masuk pada bagian atas dan air kondensat akan keluar pada bagian bawah.

*2. Direct Contact Condenser*

Cara kerja dari kondensor jenis ini yaitu proses kondensasi dilakukan dengan cara mencampurkan air pendingin dan uap (*steam*) secara langsung. Jenis dari kondensor ini disebut *spray condenser*, pada alat ini proses pencampuran dilakukan dengan menyemprotkan air pendingin ke arah uap (*steam*). Sehingga uap (*steam*) akan menempel pada butiran-butiran air pendingin tersebut dan akan mengalami kontak temperatur, selanjutnya uap akan terkondensasi dan tercampur dengan air pendingin yang mendekati *fase saturated* (basah).

### **2.2.8 Generator**

Generator adalah salah satu jenis mesin listrik yang digunakan sebagai alat pembangkit energi listrik dengan cara mengonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Pada generator, energi mekanik didapat dari penggerak mula yang bisa berupa mesin diesel, turbin, baling-baling dan lain-lain. Pada pembangkit-pembangkit besar, salah satu alat konversi yang sering digunakan yaitu generator sinkron 3 *phase*.

Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator.

Pada dasarnya, konstruksi dari generator sinkron sama seperti motor sinkron, dan secara umum dapat disebut mesin sinkron. Secara umum mesin 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. Adapun konstruksi generator AC adalah sebagai berikut:

- a. Stator, Stator adalah bagian yang diam. Memiliki alur-alur sebagai tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan stator berfungsi sebagai tempat GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi.
- b. Rotor, Rotor adalah bagian yang berputar, pada bagian ini terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah, melewati cincin geser dan sikat-sikat.
- c. Cincin geser, terbuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. *Slip ring* ini berputar bersama-sama dengan poros dan rotor.
- d. Generator penguat, Generator penguat merupakan generator arus searah yang dipakai sebagai sumber arus.

Generator sinkron pada umumnya dibuat sedemikian rupa sehingga lilitan tempat terjadinya GGL (Gaya Gerak Listrik) tidak bergerak, sedangkan kutub-kutubnya akan menimbulkan medan magnet berputar. Dapat diketahui generator sejenis ini disebut generator kutub dalam. Keuntungan dari generator jenis ini adalah untuk mengambil arus listrik yang tidak dibutuhkan oleh cincin geser dan juga sikat arang. Yang mana hal tersebut disebabkan oleh tidak berputarnya lilitan-lilitan

tempat terjadinya GGL (Gaya Gerak Listrik). Generator sinkron ini sangat cocok untuk mesin-mesin dengan tegangan tinggi dan arus yang besar seperti halnya pada pembangkit-pembangkit listrik termasuk PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) sendiri dan sebagainya.

Kutub magnet mesin sinkron sendiri dibedakan atas beberapa hal, yang pertama, kutub magnet dengan bagian kutub yang menonjol (*Sailent Pole*). Konstruksi seperti ini digunakan untuk putaran rendah, dengan jumlah kutub yang banyak, yang kedua berdasarkan kutub magnet yang mana bagian kutub yang tidak menonjol (*Non Sailent Pole*). Konstruksi seperti ini digunakan untuk putaran yang tinggi, dengan jumlah sedikit. Kira-kira  $\frac{2}{3}$  dari seluruh permukaan rotor dibuat alur-alur untuk tempat lilitan penguat. Dan yang  $\frac{1}{3}$  bagian merupakan bagian yang utuh, yang mana berfungsi sebagai inti kutub.

Menurut teori listrik, GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi yang dihubungkan pada kumparan dalam medan magnet ialah :

(Sinulingga, A.A. 2009. "Pengaruh Perubahan Beban Generator Listrik Terhadap Efisiensi Kinerja PLTU". Teknik Elektro. Universitas Sumatra Utara).

$$\begin{aligned} E &= 4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot N \text{ (Volt)} \\ E &= 2,22 \cdot f \cdot \phi \cdot Z \text{ (Volt)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dimana :

- E : GGL Induksi (Volt).
- F : Frekuensi Listrik (Hz).
- $\Phi$  : Besarnya Fluks Magnet (Weber).
- N : Jumlah Lilitan.
- Z : Jumlah Sisi Lilitan.

$$f = \frac{P \cdot n}{120} \quad (2.6)$$

Dimana :

- f : Frekuensi Listrik.
- P : Banyaknya Kutub Magnet.
- N : Putaran Generator Permenit.

Jadi jika nilai f tersebut dimasukkan ke persamaan diatas maka :

$$E = 4,44 \cdot \frac{P \cdot n}{120} \cdot \phi \cdot N \text{ (Volt)} \quad (2.7)$$

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

$$E = K \cdot n \cdot \phi \quad (2.8)$$

Dimana :

- E : GGL induksi (Volt).
- K : Konstanta (K).
- $\Phi$  : Besarnya Fluks Magnet (Weber).

Penyediaan listrik terdiri atas sistem tiga fase, dan juga terdapat tiga pasangan elektromagnetik yang terpisah serta tiga set kumparan yang juga terpisah. Dapat diketahui antara masing-masing fase terdapat selisih  $120^\circ$  listrik antara arus ketiga fase, dan ketiga fase tersebut biasanya ditandai dengan u-v-w atau dengan r-s-t, dan dapat menurut hubungan bintang atau hubungan delta. Tegangan antara dua fase ialah V, dan khusus pada hubungan bintang terdapat titik bintang, yang diberikan tanda "0". Tegangan antara fase dan titik bintang ialah  $V/\sqrt{3}$ . Daya sebuah generator 3 *phase* dinyatakan dalam rumus seperti berikut :

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

Atau

$$P = 3 V_{L-N} \cdot I \cdot \cos\phi \text{ (V dalam satu } phase) \quad (2.9)$$

Dimana :

$P$  : Daya (W).

$V_{L-L}$  : Tegangan *phase-phase* (V).

$V_{L-N}$  : Tegangan *phase-netral* (V).

$I$  : Arus beban (A).

$\cos\phi$  : Faktor daya.