



BAB II

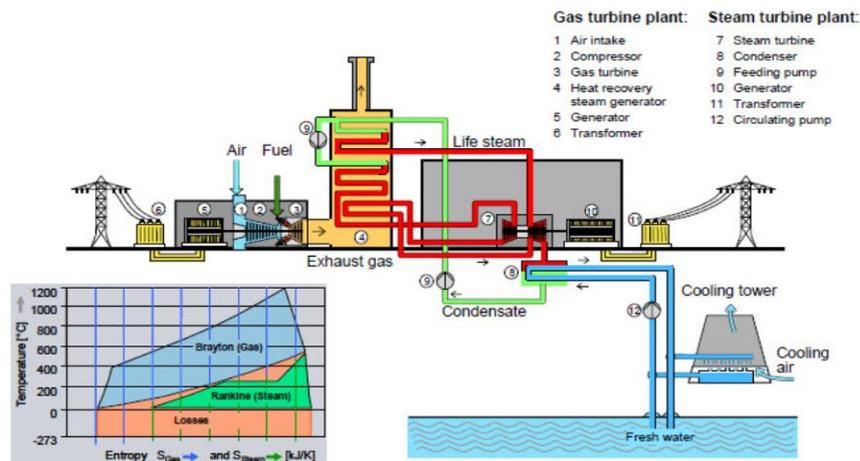
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas uap

Berdasarkan buku Teknik Pembangkitan tenaga listrik jilid 1 karangan Supari muslim, PLTGU adalah gabungan antara PLTG dengan PLTU, dimana panas dari gas buang dari PLTG digunakan untuk menghasilkan uap yang digunakan sebagai fluida kerja di PLTU. Dan bagian yang digunakan untuk menghasilkan uap tersebut adalah HRSG (Heat Recovery Steam Generator). PLTGU merupakan suatu instalasi peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi panas (hasil pembakaran bahan bakar dan udara) menjadi energi listrik yang bermanfaat. Pada dasarnya, sistem PLTGU ini merupakan penggabungan antara PLTG dan PLTU. PLTU memanfaatkan energi panas dan uap dari gas buang hasil pembakaran di PLTG untuk memanaskan air di HRSG (Heat Recovery Steam Generator), sehingga menjadi uap jenuh kering. Uap jenuh kering inilah yang akan digunakan untuk memutar sudu (baling-baling). Gas buang yang dihasilkan dalam ruang bakar pada Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG) akan menggerakkan turbin uap dan kemudian generator, yang akan mengubahnya menjadi energi listrik. Sama halnya dengan PLTU, bahan bakar PLTG bisa berwujud cair (BBM) maupun gas (gas alam). Penggunaan bahan bakar menentukan tingkat efisiensi pembakaran dan prosesnya.

2.2 Prinsip Kerja PLTGU

Dalam operasinya, unit turbin gas dapat dioperasikan terlebih dahulu untuk menghasilkan daya listrik sementara gas buangnya berproses untuk menghasilkan uap dalam ketel pemanfaat gas buang. ± 6 (enam) jam kemudian, setelah uap dalam ketel uap cukup banyak, uap dialirkan ke turbin uap untuk menghasilkan daya listrik. Cara kerja PLTGU dapat di lihat pada gambar 2.1.

Gambar 2.1 Prinsip Kerja PLTGU¹

Setiap unit PLTG mempunyai sebuah ketel uap penampung gas buang yang keluar dari unit PLTG. Uap dari tiga ketel uap unit PLTG kemudian ditampung dalam sebuah pipa pengumpul uap bersama yang dalam bahasa Inggris disebut *common steam header*. Dari pipa pengumpul uap bersama, uap dialirkan ke turbin uap PLTU yang terdiri dari turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah. Keluar dari turbin tekanan rendah, uap dialirkan ke kondensor untuk diembunkan. Dari kondensor, air dipompa untuk dialirkan ke ketel uap.

Dalam operasinya, unit turbin gas dapat dioperasikan terlebih dahulu untuk menghasilkan daya listrik sementara gas buangnya berproses untuk menghasilkan uap dalam ketel pemanfaat gas buang. Kira-kira 6 (enam) jam kemudian, setelah uap dalam ketel uap cukup banyak, uap dialirkan ke turbin uap untuk menghasilkan daya listrik.

Karena daya yang dihasilkan turbin uap tergantung kepada banyaknya gas buang yang dihasilkan unit yaitu kira-kira menghasilkan 50% daya unit PLTG, maka dalam mengoperasikan PLTGU ini, pengaturan daya PLTGU dilakukan dengan mengatur daya unit PLTG, sedangkan unit PLTU mengikuti saja, menyesuaikan gas buang yang diterima dari unit PLTG-nya. Perlu diingat bahwa selang waktu untuk pemeliharaan unit PLTG lebih pendek daripada unit

¹<http://tagoleki.com/2014/6/pembangkit-listrik-gas-uap.html>, diakses 12 juni 2019



PLTU sehingga koordinasi pemeliharaan yang baik dalam suatu blok PLTGU agar daya keluar dari blok tidak terlalu banyak berubah sepanjang waktu.

Ditinjau dari segi efisiensi pemakaian bahan bakar, PLTGU tergolong sebagai unit yang paling efisien dari unit-unit termal (bisa mencapai angka di atas 45%). PLTGU termasuk produk teknologi mutakhir dalam perkembangan pusat listrik. PLTGU PLN yang pertama beroperasi di sekitar tahun 1995. Daya terpasangnya per blok dibatasi oleh besarnya daya terpasang unit PLTGnya. Sampai saat ini, unit PLTG yang terbesar baru mencapai daya terpasang sekitar 120 MW.

2.3 Bagian- bagian PLTGU

2.3.1 Bagian umum PLTGU

Secara umum, bagian-bagian PLTGU adalah sebagai berikut :

1. Cranking Motor

Cranking Motor adalah motor yang digunakan sebagai penggerak awal saat turbin belum menghasilkan tenaga penggerak generator ataupun compressor. Motor Cranking mendapatkan suplai listrik yang berasal dari jaringan tegangan tinggi 150 KV / 500 KV Jawa – Bali.

2. Air Filter

Air Filter merupakan filter yang berfungsi untuk menyaring udara bebas agar udara yang mengalir menuju ke compressor merupakan udara yang bersih.

3. Compressor

Compressor sebagai penghisap udara luar, dengan terlebih dahulu melalui air filter. Compressor menghisap udara atmosfer dan menaikkan tekanannya menjadi beberapa kali lipat (sampai 8 kali) tekanan semula. Udara luar ini akan diubah menjadi udara atomizing untuk sebagian kecil pembakaran dan sebagian besar sebagai pendingin turbin.



4. Combustion Chamber

Combustion chamber (ruang bakar) adalah ruang yang dipakai sebagai tempat pembakaran bahan bakar (solar) dan udara atomizing. Gas panas yang dihasilkan dari proses pembakaran di combustion chamber digunakan sebagai penggerak turbin gas.

5. Gas Turbine

Gas Turbine adalah turbin yang berputar dengan menggunakan energi Gas panas yang dihasilkan dari combustion chamber. Hasil putaran dari turbin inilah yang akan diubah oleh generator untuk menghasilkan listrik.

6. Selector Valve

Selector Valve merupakan valve yang berfungsi untuk mengatur gas buangan dari turbin gas, apakah akan dibuang langsung ke udara ataukah akan dialirkan menuju ke HRSG.

7. GTG

GTG (Gas Turbine Generator) berfungsi sebagai alat pembangkit listrik dengan menggunakan tenaga putaran yang dihasilkan dari turbin gas. Pada PLTGU, satu buah generator ini menghasilkan daya bisa mencapai 100 MW. PT. PLN keramasan sendiri memiliki 2 unit GTG dengan daya keluaran sebesar 25 MW.

8. Steam Turbine

Steam Turbine (Turbin Uap) adalah turbin yang berputar dengan menggunakan energi uap. Uap ini diperoleh dari penguapan air yang berasal dari HRSG (Heat Recovery Steam Generator).

9. STG

STG (Steam Turbine Generator) merupakan generator berfungsi sebagai alat pembangkit listrik dengan menggunakan tenaga putaran yang diperoleh dari turbin uap. Tenaga penggeraknya berasal dari uap kering yang dihasilkan oleh HRSG dengan putaran 3000 RPM, berpendingin hidrogen dan tegangan keluar



11,5 KV. Pada PLTGU, satu buah generator ini menghasilkan daya kurang lebihnya sekitar 15 MW. PT. PLN Keramsasan memiliki 2 buah steam turbine generator untuk bagian PLTGU-nya.

10. HRSG

HRSG (Heat Recovery Steam Generator) PLN keramasan memiliki 2 blok Combine Cycle Power Plant dengan kapasitas masing-masing 2 x 40 MW. Per bloknya terdiri dari 2 x 25 MW turbin gas dan 2 x 15 MW turbin uap yang merupakan combine cycle dari sisa gas buang dari GTG. 100 °C tergantung dari load gas turbin dan ambien temperatur. HRSG ini didesain untuk beroperasi pada turbin gas dengan pembakaran natural gas dan destilate oil.± 514 °C (HSD) pada outlet flow gas ±Untuk masing-masing HRSG akan membangkitkan uap sebesar 10 ton/jam total flow, pada inlet flow gas.

2.3.2 Alat Bantu pada Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat yang digunakan untuk memproduksi uap dengan tekanan dan temperature tertentu. Uap yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan turbin uap sehingga dari turbin uap tersebut akan didapatkan energi mekanis. Selanjutnya, energi mekanis ini akan diubah menjadi energi listrik didalam generator .Adapun boiler sendiri mempunyai alat-alat bantu seperti berikut:

1. *Economizer*

Economizer adalah alat yang digunakan untuk memanaskan air pengisi ketel dengan media pemanas energi kalor yang terkandung didalam gas bekas. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan air pengisi ketel yang suhunya tidak jauh berbeda dengan air yang terdapat pada *boiler drum*, serta untuk menaikkan efisiensi *boiler*.



2. Drum Uap / *Steam Drum*

Steam drum adalah alat yang digunakan untuk memisahkan bagian air, uap basah dan uap kering karena didalam boiler terjadi pemanasan bertingkat. Setiap unit boiler dilengkapi oleh sebuah *steam drum* dan dipasang pada bagian atas dari *boiler*.

3. *Super Heater*.

Uap yang dihasilkan *boiler drum* ada yang masih berupa uap basah , dan untuk mendapatkan uap yang betul-betul kering. Uap basah yang berasal dari *boiler drum* perlu dipanaskan lagi pada *super heater* sehingga uap kering yang dihasilkan naik ke *steam drum* dan memutar sudu – sudu turbin uap. Setiap *boiler* biasanya dilengkapi dengan dua buah *super heater* yaitu *primary* dan *secondary super heater* yang dipasang pada bagian atas dari ruang pembakaran (*furnace*).

4. *Desuper Heater*

Desuper Heater merupakan *spray water* yang digunakan untuk mengatur temperatur uap yang dialirkan ke turbin. Alat sudah dibuat sedemikian rupa sehingga bila temperatur uap melebihi ketentuan, maka *desuper heater* ini akan menyemprotkan air yang berasal dari *discharge boiler feed pump* sampai temperaturnya normal kembali.

5. *Soot Blower*

Soot Blower merupakan alat pembersih pipa di dalam *boiler* yang diakibatkan menempelnya sisa-sisa pembakaran, dengan media pembersih *auxiliary steam*.

6. *Boiler Feed Pump (BFP)*

Boiler Feed Pump merupakan pompa pengisi air boiler. Pompa tersebut memompakan *deaerator storage tank* ke boiler.



2.3.3 Alat-alat bantu pada Turbin

1. *Condensor*

Condensor dibuat dari sejumlah pipa-pipa kecil yang mana air laut sebagai media pendingin dapat mengalir melalui pipa-pipa tersebut. Sedangkan uap bekas yang keluar dari turbin akan memasuki sela-sela pipa kondensor sehingga terjadilah perpindahan panas dari uap ke air laut yang selanjutnya akan terjadi pengembunan dan kondensasi uap. Uap yang sudah berubah menjadi air didalam kondensor ditampung didalam *hot well*. Fungsi dari *condensor* adalah sebagai berikut :

- a. Menaikkan efisiensi turbin, karena dengan mengusahakan vacuum didalam kondensor uap bekas dari turbin akan segera dapat keluar dan tidak memberikan reaksi tekanan terhadap putaran turbin.
- b. Untuk mengembunkan uap bekas dari turbin dengan media pendingin air laut yang mengalir melalui pipa-pipa kecil didalam kondensor sehingga air kondensasi tersebut dapat dijadikan sebagai air pengisi ketel.

2. *Condensate Pump*

Setelah air kondensasi terkumpul pada *hot well*, maka air tersebut dipompakan oleh *condensate pump* ke *daerator tank* dengan melalui *heater*.

3. *Low Pressure Heater*

Alat ini berguna untuk memanaskan *air condensate* yang berasal dari *hot well*, sebelum dimasukkan ke *daerator tank*. Konstruksi pemanasan ini terdiri dari pipa-pipa air yang dilalui oleh *air condensat* dan pada bagian luarnya dipanasi dengan uap yang diambilkan dari *extraction steam* dari turbin.

4. *Auxiliary Cooling Water Pump*

Pompa ini berfungsi untuk mensirkulasikan air pendingin yang dibutuhkan untuk mendinginkan minyak pelumas dan gas *hydrogen*. Air pendingin yang disirkulasikan oleh pompa ini didinginkan lagi oleh air laut didalam *auxillary cooling water heat exchanger*.



5. *High Pressure Heater*

Alat ini berguna untuk memanaskan air pengisi ketel yang berasal dari *deaerator storage tank*, yang selanjutnya akan dikirim ke ketel lewat *economizer*. Konstruksi alat ini terdiri dari pipa-pipa air yang dilalui oleh air *boiler feed* dan bagian luarnya dipanasi dengan uap.

6. *Daerator*

Daerator adalah alat yang berfungsi untuk membuang O₂ dan gas-gas lain yang terkandung dalam air kondensat, disamping itu juga berfungsi sebagai pemanas air kondensat. Alat ini dikonstruksikan dari *tray-tray* yang berlapis-lapis sehingga memungkinkan untuk membuat partikel-partikel *air condensate* yang dimasukkannya. Dengan adanya air kondensat yang sudah menjadi partikel-partikel tersebut serta adanya uap ekstraksi yang disemprotkan, maka akan memungkinkan O₂ dan gas-gas lainnya yang terkandung didalamnya akan terlepas dan dibuang ke atmosfer.

7. *Air Ejector*

Air Ejector adalah suatu alat yang dikonstruksikan dari sebuah *nozzle* sehingga bilamana dialiri uap akan dapat menarik udara dan gas-gas yang tidak dapat mengembun didalam kondensor sehingga *condensor* akan menjadi *vacuum*. Dengan adanya kevakuman pada kondensor maka akan dapat menaikkan efisiensi dari turbin.

Alat ini ada dua macam yaitu :

a. *Primming Ejector*

Primming Ejector digunakan pada saat start up, kemudian bila kemampuannya sudah mencapai batas maka penarikan *vacuum* dilakukan oleh alat lain.

b. *Air Ejector*

Air Ejector digunakan untuk menarik kevakuman setelah melalui alat *priming ejector*.

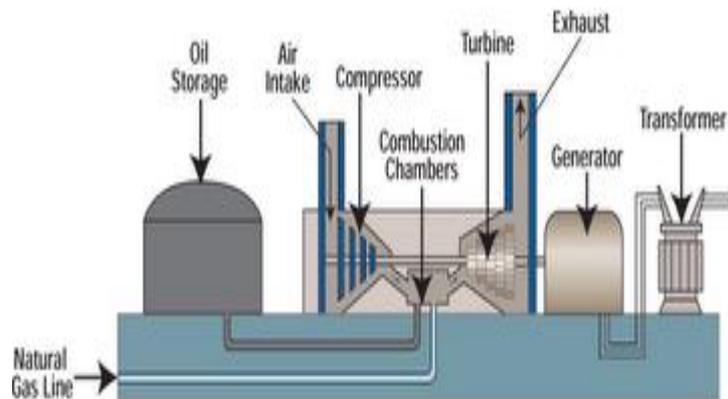


2.4 Proses Produksi Pada PLTGU

Secara umum sistem produksi tenaga listrik pada PLTG/U dibagi menjadi dua siklus, yaitu sebagai berikut :

a. Siklus Terbuka (*Open Cycle*)

Siklus Terbuka merupakan proses produksi listrik pada PLTGU dimana gas buangan dari turbin gas langsung dibuang ke udara melalui cerobong saluran keluaran. Suhu gas buangan di cerobong saluran keluaran ini mencapai 550°C . Proses seperti ini pada PLTGU dapat disebut sebagai proses pembangkitan listrik turbin gas yaitu suatu proses pembangkitan listrik yang dihasilkan oleh putaran turbin gas. Proses produksi listrik pada PLTGU ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Siklus Terbuka PLTGU²

Keterangan Gambar :

1. Pipa Gas alam
2. Oil storage (Penyimpanan minyak)
3. Air intake
4. Compressor

² <http://elektronika-listrik.blogspot.com/2014/6/pembangkit-listrik-gas-uap.html>, diakses 31 maret 2019



5. Combustion system, Membakar bahan bakar dan udara serta menghasilkan gas dengan suhu dan tekanan dan energi tinggi.
6. Turbin Gas
7. Stack/Cerobong asap, membuang sisa gas panas dari turbine
8. Generator, menghasilkan energi listrik
9. Main transformer

b. Siklus Tertutup (*Closed Cycle*)

Jika pada Siklus Terbuka gas buang dari turbin gas langsung dibuang melalui cerobong saluran keluaran, maka pada proses Siklus Tertutup, gas buang dari turbin gas akan dimanfaatkan terlebih dahulu untuk memasak air yang berada di HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Kemudian uap yang dihasilkan dari HRSG tersebut akan digunakan untuk memutar turbin uap agar dapat menghasilkan listrik setelah terlebih dahulu memutar generator. Jadi proses Siklus Tertutup inilah yang disebut sebagai proses Pembangkitan Listrik Tenaga Gas Uap yaitu proses pembangkitan listrik yang dihasilkan oleh putaran turbin gas dan turbin uap.

Daya listrik yang dihasilkan pada proses Siklus Terbuka tentu lebih kecil dibandingkan dengan daya listrik yang dihasilkan pada proses produksi listrik Siklus Tertutup. Pada prakteknya, kedua siklus diatas disesuaikan dengan kebutuhan listrik masyarakat. Misalnya hanya diinginkan Siklus Terbuka karena pasokan daya dari Siklus Terbuka sudah memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Sehingga damper (*stack holder*) yang membatasi antara cerobong gas dan HRSG dibuat *close*, dengan demikian gas buang dialirkan ke udara melalui cerobong saluran keluaran. Dan apabila dengan Siklus Terbuka kebutuhan listrik masyarakat belum tercukupi maka diambil langkah untuk menerapkan Siklus Tertutup. Namun demikian dalam sistem mekanik elektrik, suatu mesin akan lebih baik pada kondisi selalu beroperasi, karena apabila mesin berhenti akan banyak mengakibatkan korosi, perubahan pengaturan (*setting*), mur atau baut yang mulai kendur dan sebagainya. Selain itu dengan *selalu beroperasi* lebih mengefektifkan daya, sehingga daya yang dihasilkan menjadi lebih besar.



Jadi secara garis besar untuk produksi listrik di Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap dibagi menjadi 2 proses berikut ini :

- 1) Proses Pembangkitan Listrik Turbin Gas.
- 2) Proses Pembangkitan Listrik Turbin Uap

2.5 Generator Sinkron tiga 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.

Menurut Anderson P.M (1982), generator sinkron dapat menghasilkan sumber energi, yaitu : tegangan bolak-balik, oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. 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.

Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena berpengaruh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.



Adapun Besar ggl induksi kumparan stator atau ggl induksi armature per fasa adalah :

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot M \cdot \Phi \cdot K_d \dots \dots \dots (2.1)^3$$

Dimana :

E_a = Gaya gerak listrik armature per-phase (Volt)

f = Frekuensi output generator (Hz)

M = Jumlah kumparan per phase

Z = Jumlah konduktor seluruh slot per-fasa

K_d = Faktor distribusi.

Φ = Fluks magnet per kutub per-fasa

Sehingga persamaan 2.1 dapat juga ditulis

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot z/2 \cdot \Phi \cdot K_d \dots \dots \dots (2.2)^4$$

Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Perbedaan prinsip antara generator DC dan generator AC adalah untuk generator DC, kumparan jangkar ada pada bagian rotor dan terletak antara kutub-kutub magnet yang tetap ditempat, diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator sinkron, konstruksinya sebaliknya, yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersamasama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.

2.6 Konstruksi Generator sinkron 3 fasa

Menurut Kundur Prabha (1993), konstruksi generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu : stator dan rotor. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik dan rotor adalah bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator.

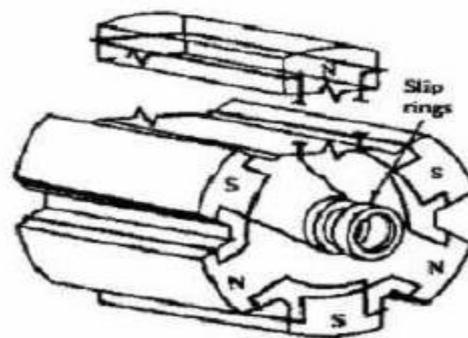
³ Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik.1, 2002, Hlm 210.

⁴ Ibid, Hlm 211.



2.6.1 Rotor

Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan 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 non salient (rotor silinder).



Gambar 2.3 Rotor kutub sepatu⁵

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 primer mover, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu.

2.6.2 Stator

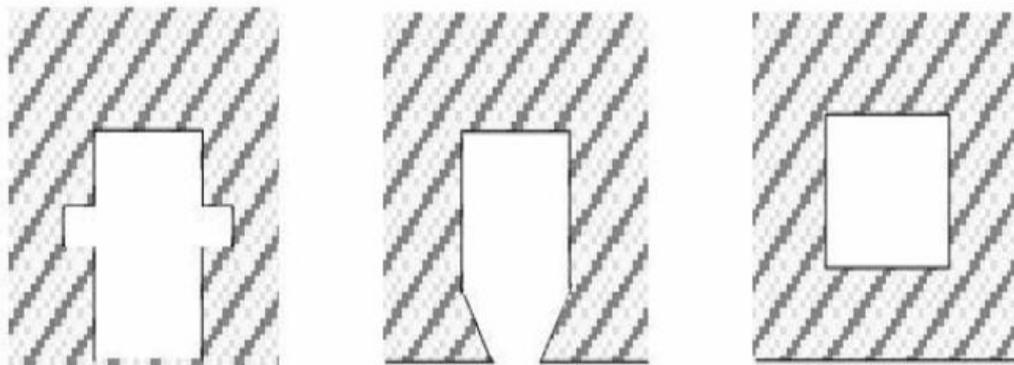
Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak.

⁵ J.Chapman Stephen, Electric Manhinery and Power System Fundamentals, 2002, Hlm 194.



Armatur selalu diam, oleh karena itu komponen ini juga disebut dengan stator. Lilitan armatur generator dalam wye dan titik netral dihubungkan ke tanah. Lilitan dalam wye dipilih karena : 1. Meningkatkan daya output. 2. Menghindari tegangan harmonik, sehingga tegangan line tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.

Stator adalah bagian diam yang mngeluarkan tegangan bolak-balik pada generator sinkron yang terdiri dari : rangka stator, inti stator dan alur dan gigi stator, serta kumparan stator. Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator. Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator. Alur (slot) dan gigi stator merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada tiga bentuk alur stator yaitu : terbuka, setengah terbuka dan tertutup. Ketiga bentuk alur tersebut tampak seperti pada gambar 2.4. Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupan tempat timbulnya ggl induksi.



Gambar 2.4 Bentuk-bentuk alur stator⁶

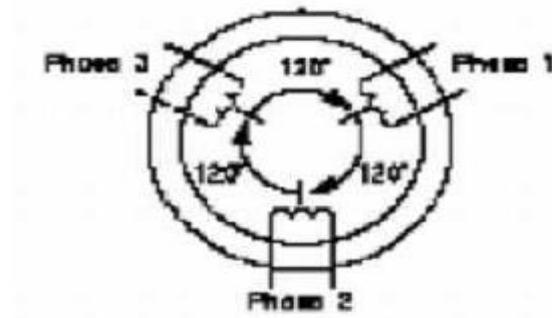
2.7 Prinsip Kerja Generator

Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum Faraday yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik.

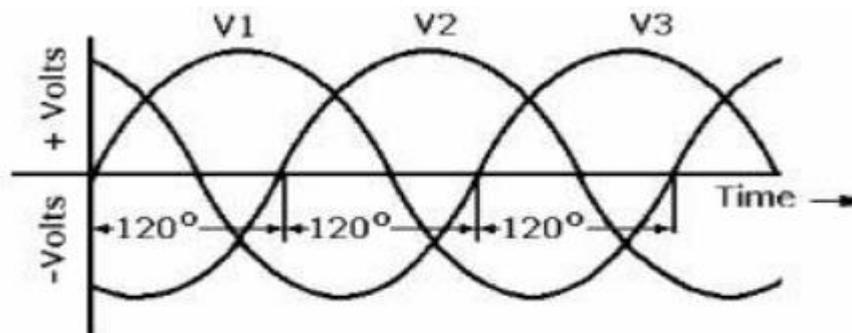
⁶ http://www.4shared.com/photo/qETzGi69/bentuk_alur_stator_generator_s.html, diakses 11 juni 2019



Prinsip kerja generator arus bolak-balik tiga fasa (alternator) pada dasarnya sama dengan generator arus bolak-balik satu fasa, akan tetapi pada generator tiga fasa memiliki tiga lilitan yang sama dan tiga tegangan outputnya berbeda fasa 120° pada masing-masing fasa. (Kundur Prabha, 1993).



Gambar 2.5 Skema kumparan tiga fasa⁷



Gambar 2.6 Grafik Tegangan generator sinkron 3 fasa⁸

2.8 Jumlah Kutub Generator

Dalam suatu generator hubungan tertentu antara kecepatan dan putaran (N) dari rotor, frekuensi (f) dari EMF / GGL yang dibangkitkan dan jumlah kutubkutub (P). Hubungan tersebut adalah :

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \dots \dots \dots 2.3^9$$

⁷<http://dc166.4shared.com/img/oFZWDSwf/skemakumparan-tiga-fasa.jpg>, diakses 11 juni 2019.

⁸Neil Selater, Electrical Design Details, 2003, Hlm 44.



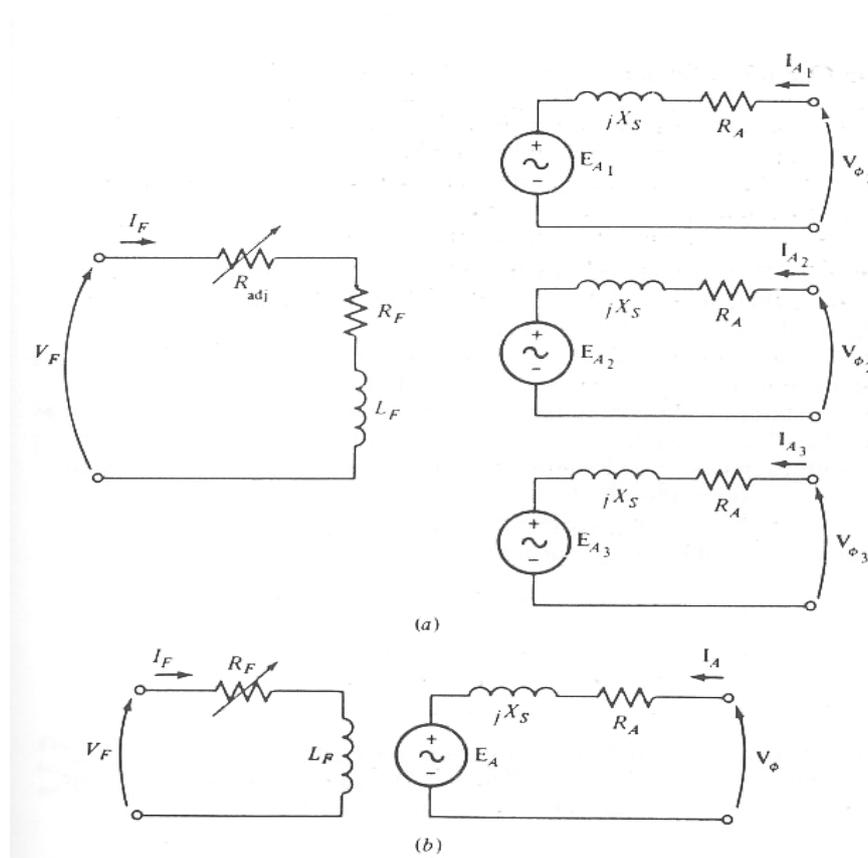
dimana,

f = Frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub pada generator

N = putaran rotor generator (rpm)

2.9 Rangkaian Ekivalen Generator sinkron



Gambar 2.7 (a) Rangkaian Ekivalen generator sinkron 3 fasa,

(b) Rangkaian ekivalen generator sinkron per pasa.¹⁰

Keterangan,

V_f = Tegangan Medan, I_f = Arus Medan, R_f = Resistansi Medan, X_f = Reaktansi

E_a = GGL induksi jangkar, I_a = Arus jangkar, V_a = Tegangan Jangkar.

⁹ Prabha kundur, op.cit, Hlm 47

¹⁰ Stephen J Chapman, Electrical machinery and fundamentals, Hlm 202



2.10 Pembebanan Generator

Pembebanan generator ada dua, yaitu generator tanpa beban dan generator berbeban.

2.10.1 Generator tanpa beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_O), yaitu :

$$E_O = 4,44 \cdot K_d \cdot f \cdot \phi M \cdot T \dots \dots \dots 2.4^{11}$$

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluk hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).

2.10.2 Generator Berbeban

Tiga macam sifat beban generator, yaitu : beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembeban ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika beban generator bersifat induktif terjadi penurunan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya terbelakang (lagging). Sebaliknya, Jika beban generator bersifat kapasitif akan terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya mendahului (leading).

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul I_a dan X_m , akibatnya timbul penurunan GGL armatur tanpa beban. menjadi $E_a = E_O - j I_a X_m$ dan tegangan terminal menjadi (V_t). GGL armatur tanpa beban (E_O) besarnya adalah :

¹¹ Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga listrik, Hlm 210



$$E_o/ph = V_t + I_a (R_a + j X_s) \dots\dots\dots 2.5$$

Atau $E_o /ph = V_t + I_a \cdot Z_s \dots\dots\dots 2.6^{12}$

2.11 Impedansi dan Resistansi

Impedansi (Z) adalah nilai hambatan yang dihasilkan dari beban berupa resistor dengan induktor / resistor dengan kapasitor / resistor dengan induktor dan kapasitor yang dirangkai seri ataupun paralel. Untuk mengetahui nilai impedansi (Z) pada rangkaian paralel resistor, induktor, kapasitor pada arus bolak balik dapat dilakukan dengan cara menghitung nilai reaktansi induktif (X_L), dan reaktansi kapasitif (X_c) dengan menggunakan rumus berikut :

1. Rumus reaktansi induktif (X_L) :

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times l \dots\dots\dots 2.7^{13}$$

2. Rumus reaktansi kapasitif (X_C) :

$$X_c = 1 / 1 \times \pi \times f \times c \dots\dots\dots 2.8$$

Keterangan :

X_L = Rektansi induktif (Ω)

X_c = Reaktansi Kapasitif (Ω)

Π = 3.14 atau 22/7

f = Frekuensi (Hz)

L = Nilai induktansi pada inductor (H)

C = Nilai kapasitas pada kapasitor (F)

¹² Yon rijono, Dasar teknik tenaga listrik, Hlm 215.

¹³ Kundur Prabha, Power system stability and control, 1993, Hal 87.



Jika nilai kedua reaktansi sudah diketahui, maka selanjutnya dapat menghitung nilai impedansi (Z) pada rangkaian parallel resistor, induktor, dan kapasitor menggunakan rumus berikut :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{X_L}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \dots\dots\dots 2.9$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω), R = Nilai hambatan atau resistansi pada resistor (Ω)

X_L = Reaktansi induktif (Ω), X_c = Reaktansi kapasitif (Ω)

Nilai tegangan (V) pada rangkaian tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang berasal dari hasil substitusi rumus hukum ohm :

$$Z = \frac{V}{I} \dots\dots\dots 2.10^{14}$$

$$Z_s = \sqrt{(R_a)^2 + (X_s)^2} \dots\dots\dots 2.11^{15}$$

Keterangan :

V = Tegangan listrik pada rangkaian (V)

I = Arus listrik pada rangkaian (A), R_a = Resistansi jangkar (Ω)

Z_s = Impedansi Sinkron (Ω), X_s = Reaktansi sinkron (Ω)

Dan faktor daya $\cos \phi$ dapat diketahui dengan rumus :

$$R = Z \cdot \cos \Phi \dots\dots\dots 2.12^{16}$$

Yang merupakan pecahan dari rumus :

$$Z = Z \cos \Phi + j Z \sin \Phi \dots\dots\dots 2.13$$

Keterangan :

R = Nilai hambatan atau resistansi (Ω), Z = Nilai impedansi pada rangkaian (Ω)

¹⁴ Sudirham sudharyanto, Analisa Rangkaian Listrik (Jilid-1), Hlm 231.

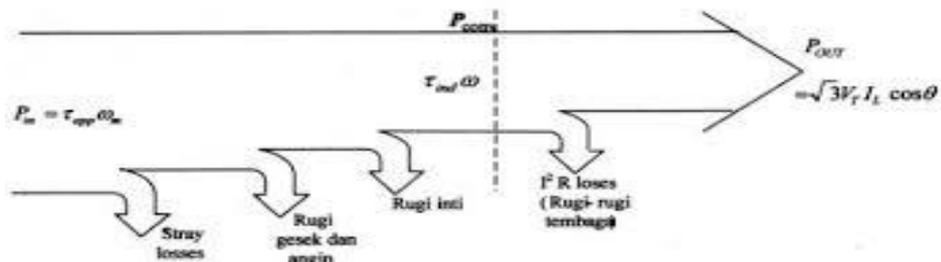
¹⁵ Yon Rijono, Dasar teknik listrik , hlm 216.

¹⁶ Rohani Sianturi, Rangkaian Listrik, Hlm 5.



2.12 Rugi – rugi pada generator Sinkron

Rugi – rugi total yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi – rugi tembaga, rugi besi dan rugi mekanik yang dapat diperhatikan pada gambar diagram dibawah ini :



Gambar 2.8 Diagram rugi-rugi pada generator sinkron¹⁷

Dimana tidak semua tenaga mekanik akan menjadi tenaga elektrik keluaran pada generator. Perbedaan antara daya keluaran dan daya masukan diwakilkan oeh rugi-rugi pada generator. Gambar 2.7 diatas menjelaskan tentang rugi-rugi tersebut. Dimana daya converter dari mekanik ke listrik akan diberikan dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{conv} = P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a \dots \dots \dots 2.14^{18}$$

Dimana perbedaan antara daya masukan generator dan daya converter pada generator adalah dimana daya converter mewakili rugi-rugi rugi mekanik, rugi inti, dan rugi *Stray* pada generator sinkron yang konstan dan tidak terpengaruh terhadap beban yang ada.

2.12.1 Rugi Listrik

Rugi listrik dikenal juga dengan rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armatur, kumparan medan. Rugi – rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dc dari lilitan pada suhu 750⁰ C dan tergantung pada tahanan efektif dari lilitan pada fluks dan frekuensi kerjanya.

¹⁷ Stephen J Chapman, Electric Machinery and fundamentals, Hlm 216

¹⁸ Ibid, Hlm 206.



Rugi kumparan armatur ($P_{ar} = I_a^2 \cdot R_a$) sebesar sekitar 30 sampai 40% dari rugi total pada beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan shunt ($P_{sh} = I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$) bersama – sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}^2 \cdot R_{sr}$) sebesar sekitar 20 sampai 30% dari rugi beban penuh.

Sangat berkaitan dengan rugi $I^2 \cdot R$ adalah rugi – rugi kontak sikat pada cincin slip dan komutator, rugi ini biasanya diabaikan pada mesin induksi dan mesin serempak, dan pada mesin dc jenis industri tegangan jatuh pada sikat dianggap tetap sebesar 2 V keseluruhannya jika dipergunakan sikat arang dan grafit dengan shunt.

2.12.2 Rugi Besi

Rugi besi disebut juga rugi magnetik yang terdiri dari histerisis dan rugi arus pusar atau arus eddy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga pada generator sinkron rugi ini dialami oleh besi armatur, meskipun pembentukan pulsa fluks yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi pada besi medan juga, terutama pada sepatu kutub atau permukaan besi medan. Rugi ini biasanya data diambil untuk suatu kurva rugi – rugi besi sebagai fungsi dari tegangan armatur disekitar tegangan ukuran. Maka rugi besi dalam keadaan terbebani ditentukan sebagai harga pada suatu tegangan yang besarnya sama dengan tegangan ukuran yang merupakan perbedaan dari jatuhnya tahanan ohm armatur pada saat terbebani. Rugi histerisis (P_h) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris yang besarnya adalah :

$$P_h = \eta_h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.15)^{19}$$

Dimana :

η_h = koefisien steinmetz histerisis. Perhatikan tabel 2.1 tentang nilai η_h dari bermacam – macam bahan baja .

B = kerapatan flux (Wb/m^2), v = volume inti (m^3)

f = frekuensi

¹⁹Yon rijono, Dasar teknik Listrik, Hlm. 143



Tabel 2.1 Nilai Koefisien Steinmetz Histerisis

Bahan	η_h (joule / m ³)
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Hard Cast steel	7040
Cast steel	750 – 3000
Cast iron	2700 – 4000

Dari persamaan diatas, besar koefisien steinmetz histerisis, kerapatan flux dan volume inti adalah konstan sehingga nilai rugi histerisis adalah merupakan fungsi dari frekuensi atau ditulis:

$$Ph = F(f) \dots \dots \dots (2.16)^{20}$$

Jadi makin besar frekuensi sinyal tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh. Adapun rugi arus pusar besarnya adalah:

$$Pe = K \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot T^2 \cdot V \text{ (Watt)} \dots \dots \dots (2.17)^{21}$$

Dimana ;

k = konstanta arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing-masing lempengan dan volume inti armature.

Oleh karena nilai k dan B adalah konstan, maka besar kecilnya rugi arus pusar adalah tergantung pada nilai frekuensi kuadrat yang ditulis:

$$Pe = F(f)^2 \dots \dots \dots (2.18)^{22}$$

Besar rugi besi adalah sekitar 20 sampai 30 % dari rugi total pada beban Nol.

²⁰ Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm. 144

^{21,22} Ibid.



2.12.3 Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari :

- Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja pada kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban dan tidak diteral.
- Rugi angin (windage loss) atau disebut juga rugi buta (stray loss) akibat adanya celah udara antara bagian rotor dan bagian stator. Besar rugi mekanik sekitar 10 sampai 20% dari rugi total pada keadaan tanpa beban.

2.13 Arus Rotor (*Field current*)

Rugi-rugi belitan akhir dan belitan terselubung maksimum per satuan volume didapatkan besaran rugi-rugi maksimum tembaga :

$$P_{cu,s} = I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots 2.19^{23}$$

Dimana :

$P_{cu,s}$ = Rugi-rugi tembaga rotor (watt)

I_s = Arus medan maksimum (ampere)

R_s = Resistansi belitan medan (ohm)

2.14 Arus Stator (*Armature current*)

Oleh karena pemanasan rotor sama dengan pemanasan stator maka persamaan pembatasnya pun mempunyai bentuk yang sama yaitu :

$$P_{cu,r} = 3. I_a^2 \times R_a \dots\dots\dots 2.20^{24}$$

Dan tegangan tembaga per phase untuk generator adalah :

$$V_T = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots 2.21^{25}$$

²³J.Chapman Stephen, Electric Machinery and Power System Fundamentals, 2002, Hlm 206.

²⁴ Ibid. hlm 216.

²⁵Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm 249



Dimana :

$P_{cu,r}$ = Rugi-rugi belitan maksimum belitan armatur (watt)

I_a = Arus armatur maksimum (ampere)

I_L = Arus pada tembaga/ line (ampere)

R_a = Resistansi belitan armatur (ohm)

2.15 Efisiensi Generator

Pada umumnya yang disebut dengan efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin-mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan berikut :

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots 2.22^{26}$$

Atau,

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma R_{ugi-rugi}} \times 100 \% \dots\dots\dots 2.23^{27}$$

Dimana,

$$\Sigma R_{ugi} = (\text{Rugi variabel} + \text{rugi konstan}) \dots\dots\dots 2.24$$

Keterangan :

P_{Out} = Daya keluaran generator (MW).

P_{In} = Daya masukan generator (MW).

ΣR_{ugi} = Total Rugi-rugi daya (MW).

Rugi variabel = Rugi Tembaga = Rugi listrik ($3 \cdot I_a^2 \times R_a$).

Rugi konstan = Rugi konversi = Rugi besi = Rugi Mekanik

Rugi konstan = $P_{conv} / P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a$

²⁶ Prie sumardjati, Teknik pemanfaatan tenaga listrik jilid 3, Hlm 404.

²⁷ Juhari, Generator kelas XI Kemendikbud, Hlm 31.