

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)**

PLTG merupakan peralatan konversi energi yang merubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik. Siklus fluida kerjanya merupakan siklus terbuka (open cycle) atau siklus sederhana (simple cycle). Prinsip kerja PLTG adalah dengan memanfaatkan tekanan aliran udara untuk menggerakkan turbin. Pertama-tama udara dinaikkan tekanannya dengan menggunakan kompresor dan kemudian dibakar di ruang pembakaran untuk meningkatkan energinya. Pembakaran dilakukan dengan menggunakan bahan bakar gas (bisa juga digunakan MFO atau HSDO, tapi dengan efisiensi yang lebih rendah). Udara yang sudah bertekanan tinggi kemudian dialirkan melalui turbin dan menggerakkan generator, sehingga menghasilkan listrik. Keuntungan lain menggunakan PLTG adalah gas yang dipakai bisa terbilang lebih mudah untuk disiapkan daripada uap, sehingga PLTG bisa mulai berproduksi dengan cepat dari keadaan 'dingin' dalam hitungan menit, jauh lebih cepat daripada PLTU.

Gas yang dihasilkan dalam ruang bakar pada pusat listrik tenaga gas (PLTG) akan menggerakkan turbin 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 Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)<sup>3</sup>**

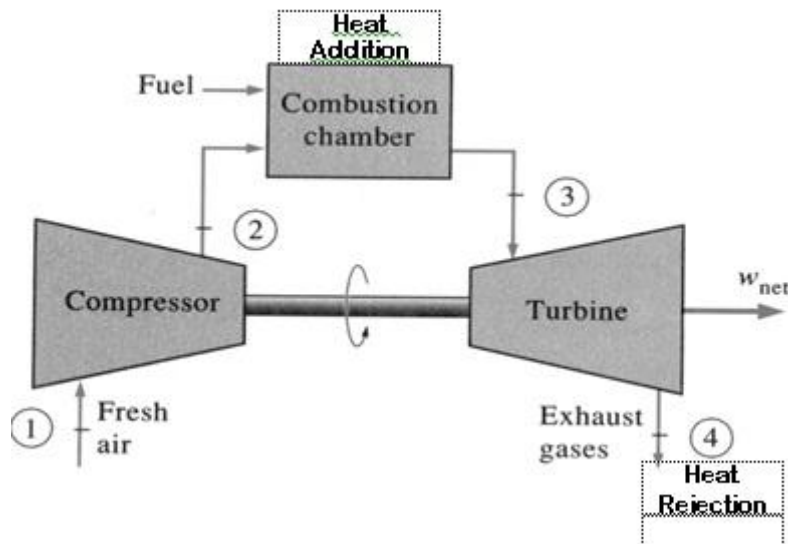
Gambar 2.1 memperlihatkan prinsip kerja PLTG. Udara masuk ke kompresor dinaikkan tekanannya menjadi kira-kira  $13 \text{ kg/cm}^2$  kemudian udara tersebut dialirkan ke ruang bakar. Dalam ruang bakar, udara bertekanan  $13 \text{ kg/cm}^2$  ini dicampur dengan bahan bakar dan dibakar. Apabila digunakan bahan bakar gas (BBG), maka gas dapat langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tetapi apabila digunakan bahan bakar minyak (BBM), maka BBM ini harus dijadikan

---

<sup>3</sup> Marsudi Djiteng, *Pembangkitan Energi Listrik* (Jakarta: Penerbit Erlangga, 2011), Ha1.13-114.



kabut terlebih dahulu kemudian baru dicampur dengan udara untuk dibakar. Teknik mencampur bahan bakar dengan udara dalam ruang bakar sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran.



**Gambar 2.1. Prinsip Kerja Unit Pembangkit Turbin Gas**

(Sumber : rakhman.net)

Pembakaran bahan bakar dalam ruang bakar menghasilkan gas bersuhu tinggi sampai kira-kira  $1.300^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan  $13\text{ kg/cm}^2$ . Gas hasil pembakaran ini kemudian dialirkan menuju turbin untuk disemprotkan kepada sudu-sudu turbin sehingga energi (*enthalpy*) gas ini dikonversikan menjadi energi mekanik dalam turbin penggerak generator (dan kompresor udara) dan akhirnya generator menghasilkan tenaga listrik.

Karena pembakaran yang terjadi pada turbin gas mencapai suhu sekitar  $1.300^{\circ}\text{C}$ , maka sudu-sudu turbin beserta porosnya perlu didinginkan dengan udara.

Selain masalah pendinginan, operasi turbin gas yang menggunakan gas hasil pembakaran dengan suhu sekitar  $1.300^{\circ}\text{C}$  memberi risiko korosi suhu tinggi, yaitu bereaksinya logam kalium, vanadium, dan natrium yang terkandung dalam



bahan bakar dengan bagian-bagian turbin seperti sudu dan saluran gas panas (*hot gas path*). Oleh karena itu, bahan bakar yang digunakan tidak boleh mengandung logam-logam tersebut di atas melebihi batas tertentu. Kebanyakan pabrik pembuat turbin gas mensyaratkan bahan bakar dengan kandungan logam kalium, vanadium, dan natrium tidak boleh melampaui 1 part per million (ppm). Di Indonesia, BBM yang bisa memenuhi syarat ini hanya minyak Solar, High Speed Diesel Oil, atau yang sering disebut minyak HSD yang disediakan oleh PERTAMINA. Sedangkan BBG umumnya dapat memenuhi syarat tersebut diatas.

### 2.3 Komponen Utama Pada Generator Turbin Gas

Generator turbin gas tersusun atas komponen-komponen utama seperti *air intake section*, *compressor section*, *combustion section*, *turbine section*, dan *exhaust section*. Berikut ini penjelasan tentang komponen utama turbin gas :

- 1) ***Air Intake Section***. Berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor. Bagian ini terdiri dari:
  - a. *Air Intake Housing*, merupakan tempat udara masuk dimana didalamnya terdapat peralatan pembersih udara.
  - b. *Inertia Separator*, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
  - c. *Pre-Filter*, merupakan penyaringan udara awal yang dipasang pada inlet house.
  - d. *Main Filter*, merupakan penyaring utama yang terdapat pada bagian dalam inlet house, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
  - e. *Inlet Bellmouth*, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
  - f. *Inlet Guide Vane*, merupakan blade yang berfungsi sebagai pengatur jumlah udara yang masuk agar sesuai dengan yang diperlukan.



- 2) **Compressor Section.** Komponen utama pada bagian ini adalah aksial *flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari *inlet air section* hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. *Aksial flow compressor* terdiri dari dua bagian yaitu:
- a. *Compressor Rotor Assembly.* Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari *wheels, stubshaft, tie bolt* dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor.
  - b. *Compressor Stator.* Merupakan bagian dari casing gas turbin yang terdiri dari:
    1. *Inlet Casing*, merupakan bagian dari casing yang mengarahkan udara masuk ke *inlet bellmouth* dan selanjutnya masuk ke *inlet guide vane*.
    2. *Forward Compressor Casing*, bagian casing yang didalamnya terdapat empat *stage compressor blade*.
    3. *Aft Casing*, bagian casing yang didalamnya terdapat *compressor blade* tingkat 5-10.
    4. *Discharge Casing*, merupakan bagian *casing* yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi.
- 3) **Combustion Section.** Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke *transition pieces* yang juga berfungsi sebagai *nozzle*. Fungsi dari keseluruhan adalah untuk



mensuplai energi panas ke siklus turbin. pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya bervariasi tergantung besar *frame* dan penggunaan turbin gas. Komponen-komponen itu adalah :

- a. *Combustion Chamber*, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.
- b. *Combustion Liners*, terdapat didalam combustion chamber yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
- c. *Fuel Nozzle*, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam combustion liner.
- d. *Ignitors (Spark Plug)*, berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam combustion chamber sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.
- e. *Transition Pieces*, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran nozzle dan sudu-sudu turbin gas.
- f. *Cross Fire Tubes*, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua combustion chamber.
- g. *Flame Detector*, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.

**4) Turbin Section.** Turbin section merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor aksial dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60 % digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan. Komponen-komponen pada *turbin section* adalah sebagai berikut :

- a. *Turbin Rotor Case*
- b. *First Stage Nozzle*, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke first



stage turbine wheel.

- c. *First Stage Turbine Wheel*, berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa putaran rotor.
- d. *Second Stage Nozzle* dan *Diafragma*, berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke second stage turbine wheel, sedangkan diafragma berfungsi untuk memisahkan kedua turbin wheel.
- e. *Second Stage Turbine*, berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari first stage turbine untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar

5) ***Exhaust Section***. *Exhaust section* adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas. *Exhaust section* terdiri dari beberapa bagian yaitu : *Exhaust frame assembly*, dan *exhaust gas* keluar dari turbin gas melalui *exhaust diffuser* pada *exhaust frame assembly*, lalu mengalir ke *exhaust plenum* dan kemudian didifusikan dan dibuang ke atmosfer melalui *exhaust stack*, sebelum dibuang ke atmosfer gas panas sisa tersebut diukur dengan *exhaust thermocouple* dimana hasil pengukuran ini digunakan juga untuk data pengontrolan temperatur dan proteksi temperatur trip. Pada *exhaust area* terdapat 18 buah termokopel yaitu, 12 buah untuk temperatur kontrol dan 6 buah untuk temperatur trip.

#### 2.4 Komponen Penunjang Pada Generator Turbin Gas

Adapun beberapa komponen penunjang dalam sistem turbin gas adalah sebagai berikut :

- 1) ***Starting Equipment***. Berfungsi untuk melakukan start up sebelum turbin bekerja. Jenis-jenis *starting equipment* yang digunakan di unit-unit turbin gas pada umumnya seperti *diesel engine* (PG-9001 A/B), *induction motor*



(PG-901 C/H dan KGT 4X01, 4X02 dan 4X03), dan *gas expansion turbine*.

2) **Coupling dan Accessory Gear.** Berfungsi untuk memindahkan daya dan putaran dari poros yang bergerak ke poros yang akan digerakkan. Ada tiga jenis coupling yang digunakan, yaitu :

1. *Jaw clutch*, menghubungkan starting turbine dengan accessory gear dan HP turbin rotor.
2. *Accessory Gear Coupling*, menghubungkan *accessory gear* dengan HP turbin rotor.
3. *Load Coupling*, menghubungkan LP turbin rotor dengan kompresor beban.

3) **Fuel Sistem.** Bahan bakar yang digunakan berasal dari fuel gas sistem dengan tekanan sekitar 15 kg/cm<sup>2</sup>. Fuel gas yang digunakan sebagai bahan bakar harus bebas dari cairan kondensat dan partikel-partikel padat. Untuk mendapatkan kondisi tersebut diatas maka ini dilengkapi dengan *knock out drum* yang berfungsi untuk memisahkan cairan-cairan yang masih terdapat pada *fuel gas*.

4) **Lube Oil Sistem.** *Lube oil sistem* berfungsi untuk melakukan pelumasan secara kontinu pada setiap komponen turbin gas. *Lube oil* disirkulasikan pada bagian-bagian utama turbin gas dan trush bearing juga untuk *accessory gear* dan yang lainnya. *Lube oil sistem* terdiri dari :

- a. *Oil tank (Lube Oil Reservoir)*
- b. *Oil quantity*
- c. Pompa
- d. *Filter sistem*
- e. *Valving sistem*
- f. *Piping sistem*
- g. Instrument untuk oil



## 2.5 Generator

Generator adalah mesin yang dapat mengubah tenaga mekanis menjadi tenaga listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator ini memperoleh energi mekanis dari *prime mover* atau penggerak mula.

Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor.

### 2.5.1 Generator DC

Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Prinsip pembangkitan tegangan induksi oleh sebuah generator diperoleh melalui dua cara :

- 1) Dengan menggunakan cincin-seret, menghasilkan tegangan induksi bolak-balik
- 2) Dengan menggunakan komutator, menghasilkan tegangan DC Untuk tegangan induksi, berlaku hubungan :

$$E_a = C_n \phi \text{ Volt} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

$\phi$  = fluks per kutub

n = kecepatan rotasi per menit

C = konstanta

P = jumlah kutub

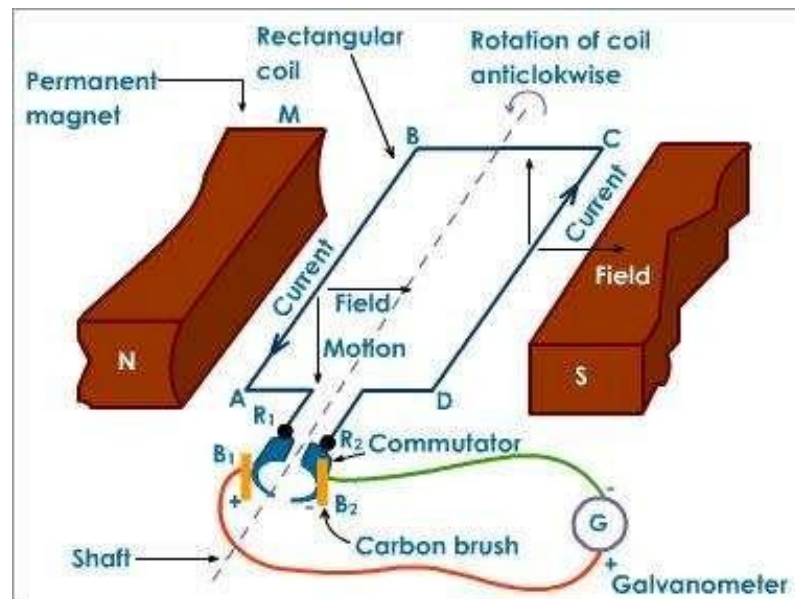
Z = jumlah penghantar jangkar<sup>2</sup>

Berdasarkan cara memberi fluks pada kumparan medannya, generator arus searah dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu generator berpenguat bebas dan generator berpenguat sendiri.

---

<sup>2</sup> Juhari. *Generator Semester 3 Kelas XI*. (Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2014), Hal. 18





**Gambar 2.2 Generator DC**

(sumber : [www.tutorvista.com](http://www.tutorvista.com))

### 2.5.1.1 Generator Berpenguat Bebas (Penguatan Medan Terpisah)<sup>5</sup>

Tegangan searah yang ditetapkan pada kumparan medan magnet yang mempunyai tahanan  $R_f$  akan menghasilkan arus  $I_f$  dan menimbulkan fluks pada kedua kutub. Tegangan induksi akan dibangkitkan pada generator.

Jika generator dihubungkan dengan beban dan  $R_a$  adalah tahanan dalam generator maka hubungan yang dapat dinyatakan adalah :

$$V_f = I_f R_f \dots \dots \dots (2.3)$$

$$E_a = V_t + I_a R_a \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

$V_f$  = tegangan medan (V)

$I_f$  = arus medan (A)

$R_f$  = tahanan medan ( $\Omega$ )

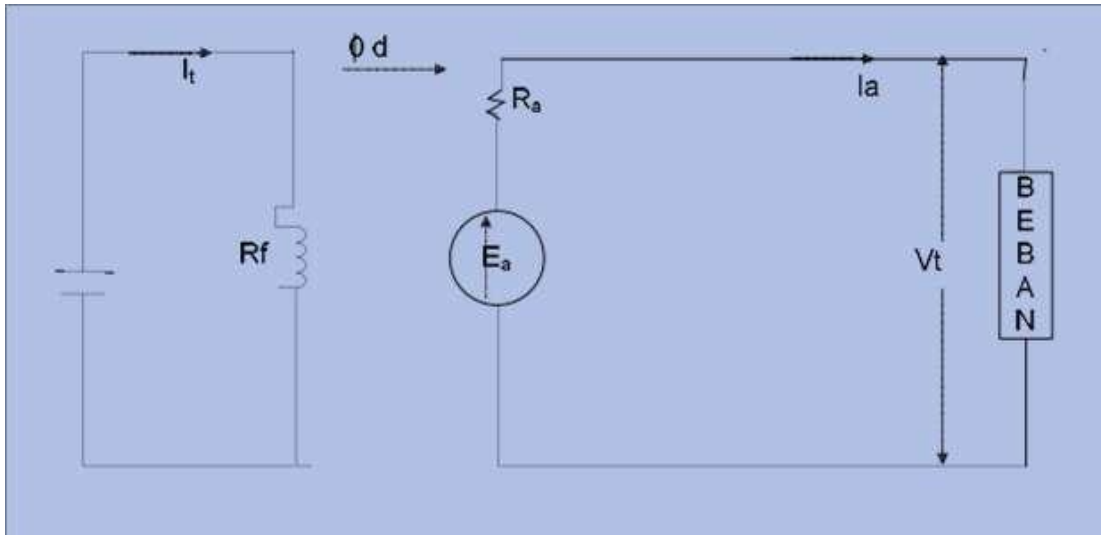
$E_a$  = GGL armatur (V)

$V_t$  = tegangan terminal (V)

$R_a$  = tahanan kumparan jangkar ( $\Omega$ )



Berikut merupakan gambar berpenguat bebas yang ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini :



**Gambar 2.3 Rangkaian Generator Berpenguat Bebas**

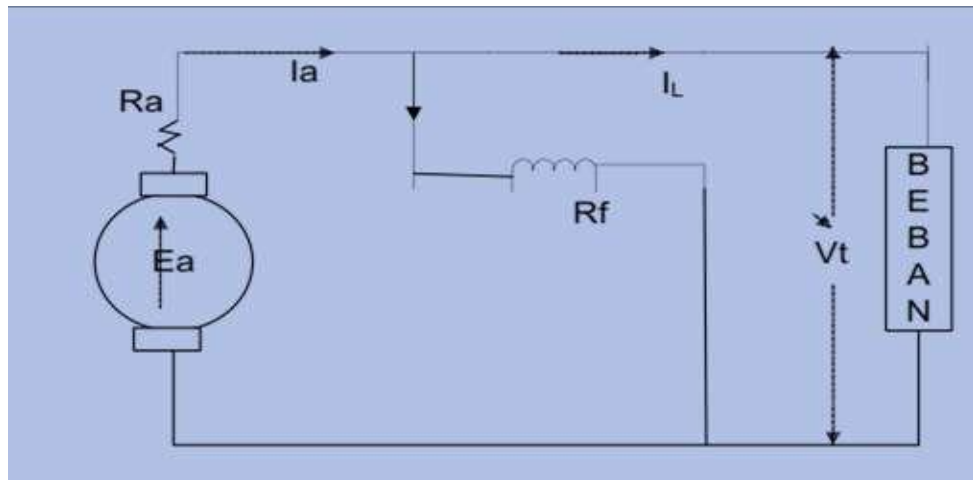
### 2.5.1.2 Generator Berpenguat Sendiri

Yang dimaksud dengan generator berpenguat sendiri adalah arus listrik yang dialirkan melalui kumparan penguat medan ( $R_f$ ) diambilkan dari output generator tersebut.

Ada tiga generator berpenguat sendiri yaitu :

- a. Generator shunt
  - b. Generator seri
  - c. Generator kompond
- a. Generator Shunt

Gambar 2.4 merupakan bagan rangkaian listrik dari generator shunt adalah kumparan penguat medan dipasang paralel terhadap kumparan armatur.



**Gambar 2.4 Rangkaian Generator Shunt**

Dari gambar 2.4, berlaku persamaan-persamaan

$$V_t = I_{sh} \cdot R_{sh} = I_L \cdot Z_L \dots\dots\dots (2.5)$$

$$E_a = I_a R_a + V_t \dots\dots\dots (2.6)$$

$$P_a = I_a^2 \cdot R_a + V_t (I_L + I_{sh})$$

$$P_a = I_a^2 \cdot R_a + V_t \cdot I_L + I_{sh}^2 \cdot R_{sh} \dots\dots\dots (2.6a)$$

atau :

$$E_a = I_a \cdot R_a + I_{sh} \cdot R_{sh} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$P_a = E_a \cdot I_a \dots\dots\dots (2.8)$$

$$P_o = V_t \cdot I_L \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana :

$I_{sh}$  = Arus shunt yang mengalir melalui kumparan medan

$R_{sh}$  = Hambatan kumparan medan

$Z_L$  = Beban generator

$I_L$  = Arus beban



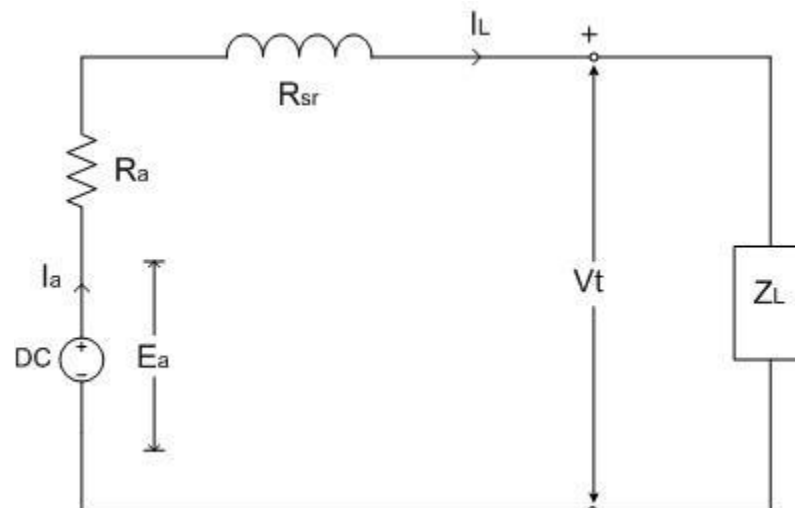
$$I_a = I_{sh} + I_L \dots\dots\dots (2.10)$$

Agar kumparan medan (kumparan shunt) tidak menarik arus armatur yang besar, dan supaya diperoleh arus beban ( $I_L$ ) yang cukup besar, maka diameter kawat kumparan shunt dipilih yang kecil dan jumlah kumparan yang banyak. Dengan diameter kawat kecil, maka tidak terlalu makan ruangan.

Adapun kelemahan dari generator shunt adalah tenaga atau daya output ( $P_o$ ) kecil karena arus penguatnya kecil. Tapi keuntungannya, tegangan output stabil.

#### b. Generator Seri

Untuk mendapatkan arus penguat yang besar agar flux magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan menjadi besar, maka diameter kawat kumparan medan dipilih yang besar. Untuk itu, kumparan medan disambung seri dengan hambatan armatur (Perhatikan) gambar 2.5



**Gambar 2.5 Rangkaian Generator Seri**

Dengan pengambilan diameter kawat kumparan cukup besar, maka kumparan ini akan memakan ruangan rotor. Dari gambar 2.5 berlaku persamaan



$$E_a = I_a \cdot R_a + I_a \cdot R_{sr} + V_t \dots\dots\dots (2.11)$$

$$P_a = I_a^2 \cdot (R_a + R_{sr}) + V_t \cdot I_L \dots\dots\dots (2.11a)$$

$$I_L = I_a \dots\dots\dots (2.12)$$

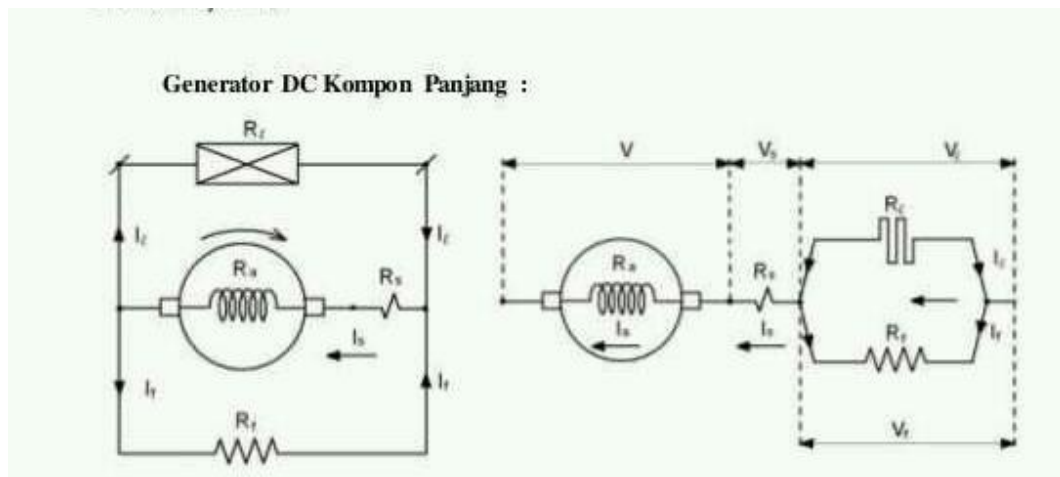
$$P_o = V_t \cdot I_L \dots\dots\dots (2.13)$$

$$P_a = E_a \cdot I_a \dots\dots\dots (2.14)$$

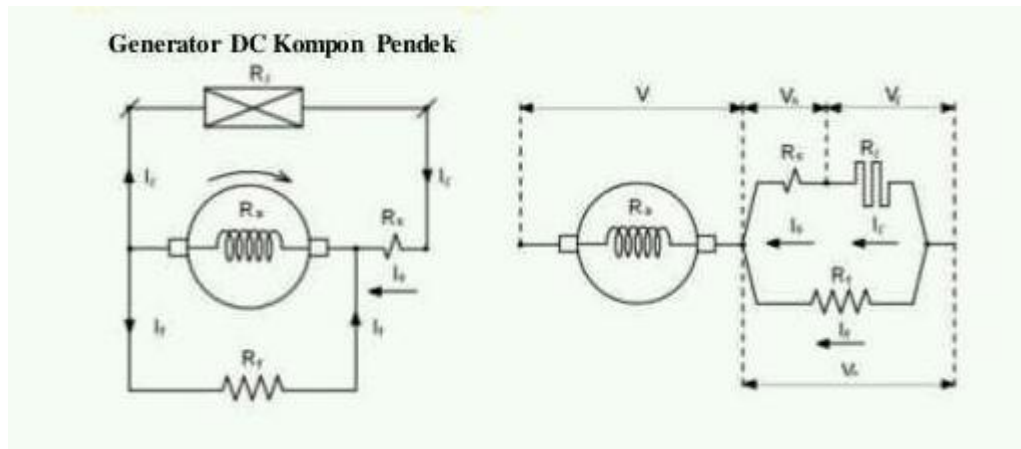
Kelemahan dari generator seri adalah tegangan output (terminal) tidak stabil karena arus beban ( $I_L$ ) berubah-ubah sesuai dengan beban yang dipikul. Hal ini menyebabkan flux magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan seri tidak stabil. Keuntungannya adalah daya output menjadi besar.

### c. Generator Kompond

Upaya untuk mengurangi kelemahan yang terjadi pada generator shunt maupun seri, dibuatlah generator kompond. Bentuk rangkaian dari generator tersebut terlihat pada gambar 2.6 dan 2.7



**Gambar 2.6 Rangkaian Generator Kompond Panjang**



Gambar 2.7 Rangkaian Generator Kompond Pendek

Pada generator kompond panjang berlaku persamaan :

$$V_t = I_{sh} \cdot R_{sh} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$E_a = I_a \cdot R_a + I_a \cdot R_{sr} + V_t + V_s \dots\dots\dots (2.16)$$

$$E_a \cdot I_a = I_a^2 \cdot R_a + I_a^2 \cdot R_{sr} + V_t \cdot I_a + V_s \cdot I_a$$

$$P_a = -I_a^2 R_a + I_a^2 \cdot R_{sr} + I_{sh}^2 \cdot R_{sh} + V_t \cdot I_L + V_s \cdot I_a \dots\dots\dots (2.16a)$$

$$P_o = V_t \cdot I_L \dots\dots\dots (2.17)$$

Pada generator kompond pendek berlaku persamaan :

$$E_a = I_a \cdot R_a + V_{sh} + V_s \dots\dots\dots (2.18)$$

atau :

$$E_a = I_a \cdot R_a + I_L \cdot R_{sr} + V_t + V_s \dots\dots\dots (2.19)$$

$$P_a = -I_a^2 R_a + I_L^2 \cdot R_{sr} + I_{sh}^2 \cdot R_{sh} + V_t \cdot I_L + V_s \cdot I_a \dots\dots\dots (2.20)$$

$$V_{sh} = I_{sh} \cdot R_{sh}$$

$$P_o = V_t \cdot I_L$$



dimana :

$V_s$  = Tegangan jatuh pada sikat

$V_s \cdot I_a$  = Rugi daya pada sikat

$I_a^2 \cdot R_a$  = Rugi daya pada armatur

$I_a^2 \cdot R_{sr}$  = Rugi daya pada kumparan medan seri

$I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$  = Rugi daya pada kumparan medan shunt<sup>5</sup>

### 2.5.2 Generator AC<sup>5</sup>

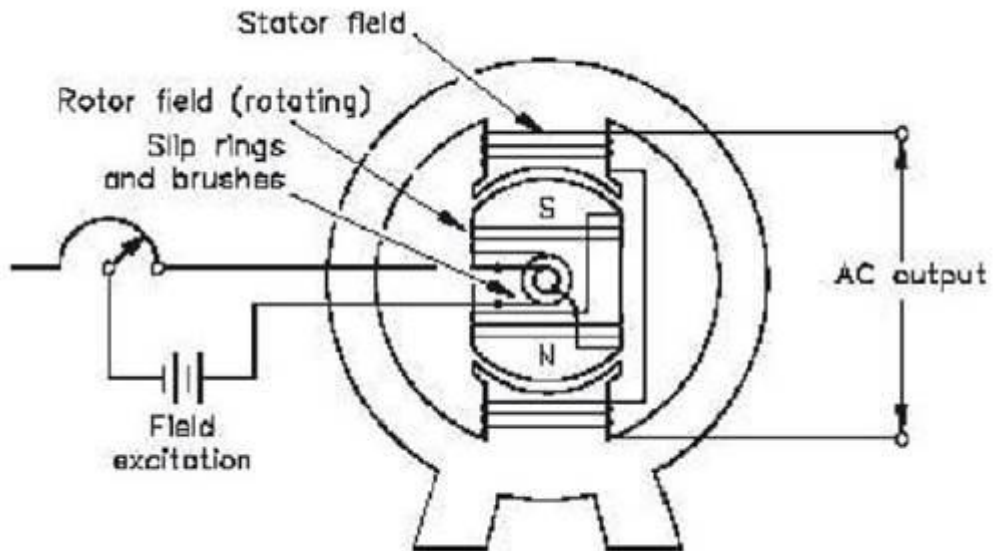
Generator arus bolak-balik yang kadang-kadang disebut dengan generator sinkron atau alternator adalah sebuah peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah energi gerak (mekanis) menjadi energi listrik AC dimana kecepatan putaran medan dan kecepatan putaran rotornya sama atau tidak ada slip. Perbedaan prinsip antara generator DC dengan generator AC adalah jika generator DC, kumparan jangkar ada pada bagian rotor dan terletak diantara kutub-kutub magnet yang tetap di tempat, diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator AC, konstruksinya sebaliknya yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik (Perhatikan gambar )

jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak diantara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga gas atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau flux yang bersifat bolak-balik atau flux putar. Flux putar ini akan memotong-motong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dari flux putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

<sup>5</sup> Rijono Yon, *Dasar Teknik Tenaga Listrik* (Jakarta : Penerbit Andi, 2004) Hal. 132-136



Generator sinkron yang banyak dijumpai di masyarakat adalah generator tiga fasa, dalam hal ini jumlah kumparan stator ada tiga kelompok atau tiga fasa.



**Gambar 2.8 Konstruksi Generator Sinkron**

Adapun besar ggl induksi kumparan stator atau ggl induksi armatur per fasa adalah:

$$E_{a/ph} = 4,44.f.M.\phi.kd \dots\dots\dots (2.21)$$

dimana:

$E_a$  = Gaya gerak listrik armatur per fasa (volt)

$f$  = Frekuensi output generator (Hz)

$M$  = Jumlah kumparan per fasa ( $Z/2$ )

$Z$  = jumlah konduktor seluruh plot per fasa

$kd$  = faktor distribusi. Hal ini diperlukan karena kumparan armatur atau alternator tidak terletak di dalam satu slot melainkan terdistribusi dalam beberapa slot per fasa.

$\Phi$  = flux magnet per kutub per fasa

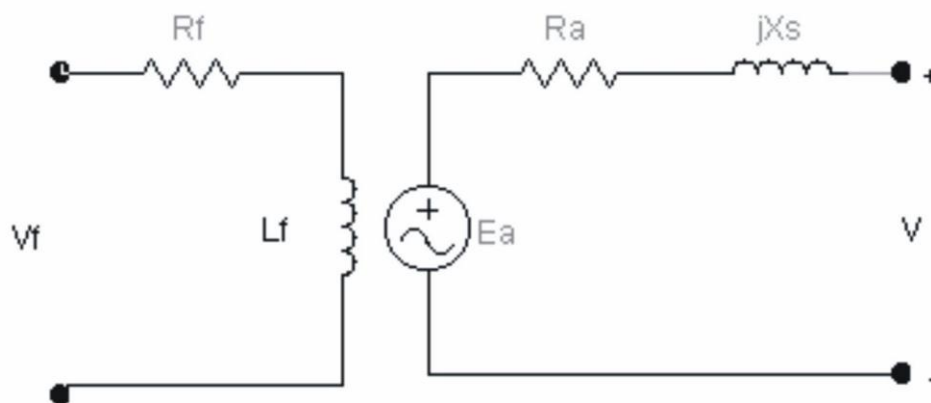
Sehingga persamaan dapat juga ditulis:





$$E_{a/ph} = 4,44.f. \frac{Z}{2} \cdot \Phi \cdot kd \dots\dots\dots (2.22)$$

Flux magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor tidak seluruhnya tercakup oleh kumparan stator. Dengan perkataan lain, pada kumparan stator terdapat flux bocor dan hal ini dinyatakan dengan armatur ( $R_a$ ) dan reaktansi bocor atau reaktansi armatur ( $X_L$ ). Sehingga bagan rangkaian ekivalen dari generator sinkron keadaan jalan tanpa beban berikut di bawah ini:



**Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron**

([Kurniawanpramana.files.wordpress.com](http://Kurniawanpramana.files.wordpress.com))

Keterangan:

$I_f$  = Arus kumparan medan atau arus penguat

$R_f$  = hambatan kumparan medan

$R_a$  = hambatan armatur

$X_L$  = Reaktansi bocor (reaktansi armatur)

$V_t$  = Tegangan output

$E_a$  = Gaya gerak listrik armatur



**2.5.2 Generator AC Keadaan Jalan Tanpa Beban**

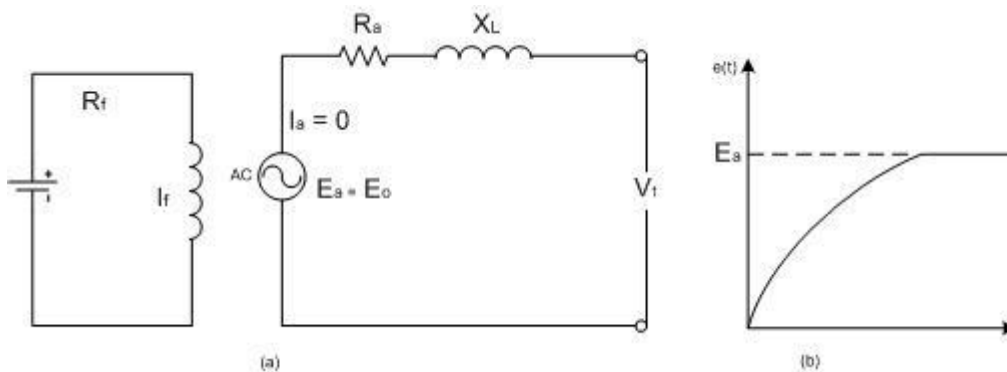
Pada generator AC keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armatur ( $I_a$ ) = 0. Dengan demikian besar tegangan terminal adalah :

$$V_t = E_a = E_o \dots\dots\dots (2.23)$$

Oleh karena besar ggl armatur merupakan fungsi dari flux magnetik maka ggl armatur dapat juga ditulis :

$$E_a = f(\Phi) \dots\dots\dots (2.24)$$

Dari persamaan 2.24, jika arus penguat medan diatur besarnya maka akan diikuti kenaikan flux dan akhirnya juga pada ggl armatur. Pengaturan arus penguat medan pada keadaan tertentu besarnya, akan didapatkan besar ggl armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara arus penguat medan ( $I_f$ ) dan  $E_a$  terlukis pada gambar 2.10b.



**Gambar 2.10 Generator AC Tanpa Beban**

**2.5.3 Generator AC Berbeban**

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator AC, maka segera mengalir arus armatur ( $I_a$ ) dengan adanya arus armatur ini, pada kumparan armatur atau kumparan jangkar timbul fluks putar jangkar. Fluks putar jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah fluks putar yang dihasilkan oleh kumparan



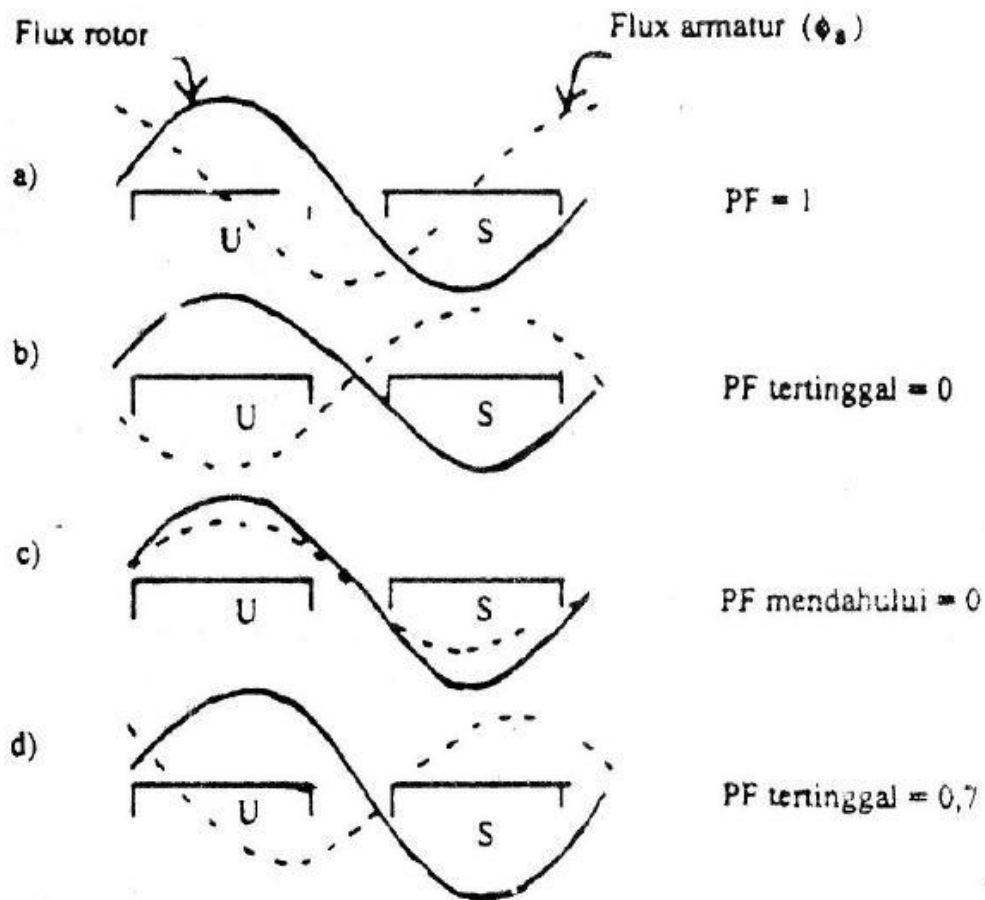
rotor. Hal ini tergantung pada faktor daya beban. Untuk kutub jelasnya perbaiki Gambar 2.11.

Dari Gambar 2.11 a pada faktor daya beban (PF) = 1 berarti arus armatur sefase dengan tegangan beban. Pada keadaan ini, fluks putar jangkar (fluks putar armatur) adalah tertinggal  $90^\circ$  terhadap fluks putar utama (flux putar rotor). Interaksi dari fluks putar baru cacat (sinyal fluks baru tidak sinus murni). Akibatnya tegangan generator juga tidak sinus murni. Kejadian ini harus dihindarkan.

Gambar 2.11 b adalah faktor daya beban tertinggal (PF) = 0, hal ini berarti arus armatur tertinggal  $90^\circ$  terhadap tegangan beban. Keadaan ini menyebabkan flux putar jangkar berbeda phase  $180^\circ$  (posisi  $\phi_a$  pada PF = 1 digeser ke kiri/tertinggal  $90^\circ$  lagi, jadi  $90^\circ + 90^\circ$ ) terhadap flux putar rotor. Interaksi dari kedua flux putar tersebut menyebabkan terjadinya pengurangan besar flux rotor, dan keadaan ini disebut “Demagnetisasi”. Jika proses demagnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang dihasilkan oleh generator akan berkurang. Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan ( $I_f$ ) harus diperbesar.

Dari gambar 2.11 c yaitu pada PF = 0 mendahului, berarti arus armatur mendahului  $90^\circ$  terhadap tegangan beban. Jika hal ini terjadi, maka flux putar armatur akan sefase dengan flux putar rotor (posisi  $\phi_a$  pada PF = 1 digeser ke kanan  $90^\circ$ ). Akibat interaksi dari kedua flux ini dihasilkan flux baru yang bertambah besar terhadap flux rotor. Proses ini disebut “Magnetisasi”. Jika magnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang ditimbulkan akan bertambah besar. Untuk menjaga ggl armatur tetap besarnya, maka arus penguat medan harus dikurangi.

Untuk kejadian terakhir (gambar 2.11 d) yaitu pada faktor daya beban menengah. Maksud dari faktor daya beban menengah adalah beda fase antara arus armatur dan tegangan beban 0 sampai  $90^\circ$  (tertinggal).

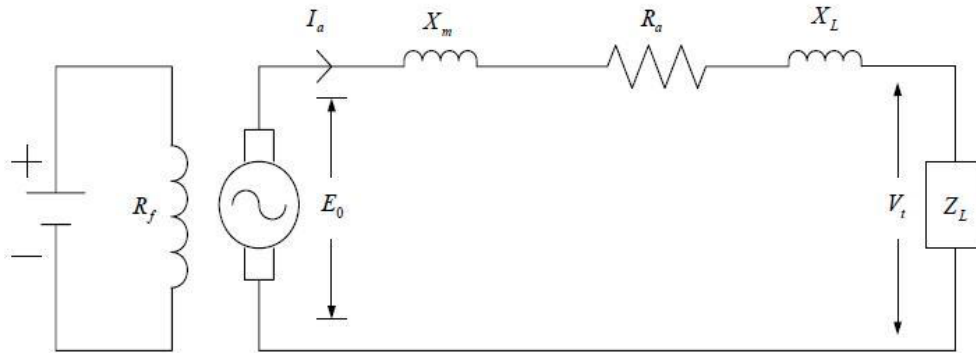


**Gambar 2.11 Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap Flux Rotor**

Dengan adanya flux putar armatur akibat timbulnya arus armatur, maka pada kumparan timbul reaktansi pemagnet  $X_m$ . Reaktansi pemagnet bersama-sama dengan reaktansi bocor dikenal dengan nama reaktansi sinkron ( $X_s$ ) dan secara matematis ditulis :

$$X_s = X_L + X_m \dots\dots\dots (2.25)$$

Dengan demikian, bagan rangkaian listrik dari generator sinkron berbeban adalah :



**Gambar 2.12 Rangkaian Ekivalen Generator Berbeban**

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul  $I_a$  dan  $X_m$  akibatnya timbul penurunan ggl armatur tanpa beban.  $E_o$  menjadi  $E_a = E_o - j I_a X_m$  dan tegangan terminal menjadi  $(V_t)_{bp}$ . Ggl armatur tanpa beban ( $E_o$ ) besarnya adalah :

$$E_o/ph = V_t + I_a (R_a + j X_s) \dots\dots\dots (2.26)$$

atau :

$$E_o/ph = V_t + I_a Z_s \dots\dots\dots (2.27)^5$$

**2.5.3 Pengaturan Tegangan Generator**

Jika beban ditambahkan pada generator AC yang sedang bekerja pada kecepatan konstan dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan faktor daya beban.

Pengaturan generator AC didefinisikan sebagai persentase kenaikan tegangan terminal ketika beban dikurangi dari arus beban penuh terminal sampai nol, dimana kecepatan dan eksitasi medan dijaga konstan.

<sup>5</sup> Rijono Yon, *Dasar Teknik Tenaga Listrik* (Jakarta : Penerbit Andi, 2004) Hal. 209-215



Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut :

1. Penurunan tegangan IR pada lilitan jangkar
2. Penurunan tegangan IXL pada lilitan jangkar
3. Reaksi jangkar (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar)<sup>1</sup>

Untuk menghitung tegangan yang dibangkitkan generator perfasa maka dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$E_o = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin \theta + I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

$E_o$  = Tegangan yang dibangkitkan (volt)

$V_t$  = Tegangan per phasa (Volt)

$I_a$  = Arus nominal (A)

$R_a$  = Tahanan dalam jangkar

$X_s$  = Reaktansi<sup>5</sup>

dan menghitung tegangan yang dibangkitkan oleh generator adalah :

$$(E_o)_L = \sqrt{3} \times E_o / \text{ph} \dots\dots\dots (2.29)$$

Untuk mengatasi generator terhindar dari beban lebih, maka diperlukan pengaturan tegangan beban atau presentase regulasi tegangan. Adapun besar persentase regulasi tegangan maksimum yang diizinkan adalah 40% dan secara matematis ditulis:

$$1. \text{Regulasi Naik} = \frac{(V_t)_{tb} - (V_t)_{bp}}{(V_t)_{bp}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.30)$$

$$2. \text{Regulasi Turun} = \frac{(V_t)_{tb} - (V_t)_{bp}}{(V_t)_{tb}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.31)$$

<sup>1</sup> Eugene C. Lister, Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam (Jakarta: Penerbit Erlangga, 1993) Hal. 202

<sup>5</sup> Rijono Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik (Jakarta : Penerbit Andi, 2004) Hal. 216

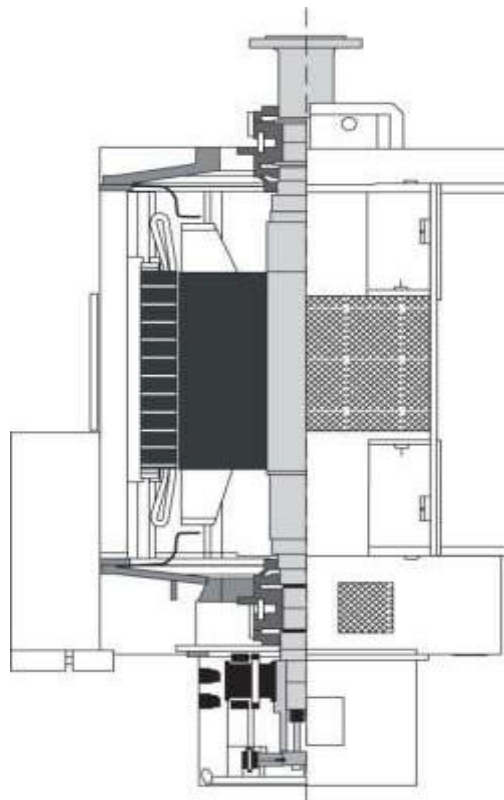


Dimana  $(V_t)_{tb}$  adalah tegangan terminal atau tegangan output generator tanpa beban yang besarnya sama dengan ggl armatur ( $E_o$ ) pada persamaan 2.28. sedangkan  $(V_t)_{bp}$  adalah tegangan terminal beban penuh,

$$\text{dimana, } V_t = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.32)$$

## 2.6 Turbin

Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Turbin sederhana memiliki satu bagian yang bergerak, “assembly rotor blade” fluida yang bergerak menjadikan baling-baling berputar dan menghasilkan energi untuk menggerakkan rotor. Contoh turbin awal adalah kincir angin dan roda air.



**Gambar 2.13 Turbin Generator**

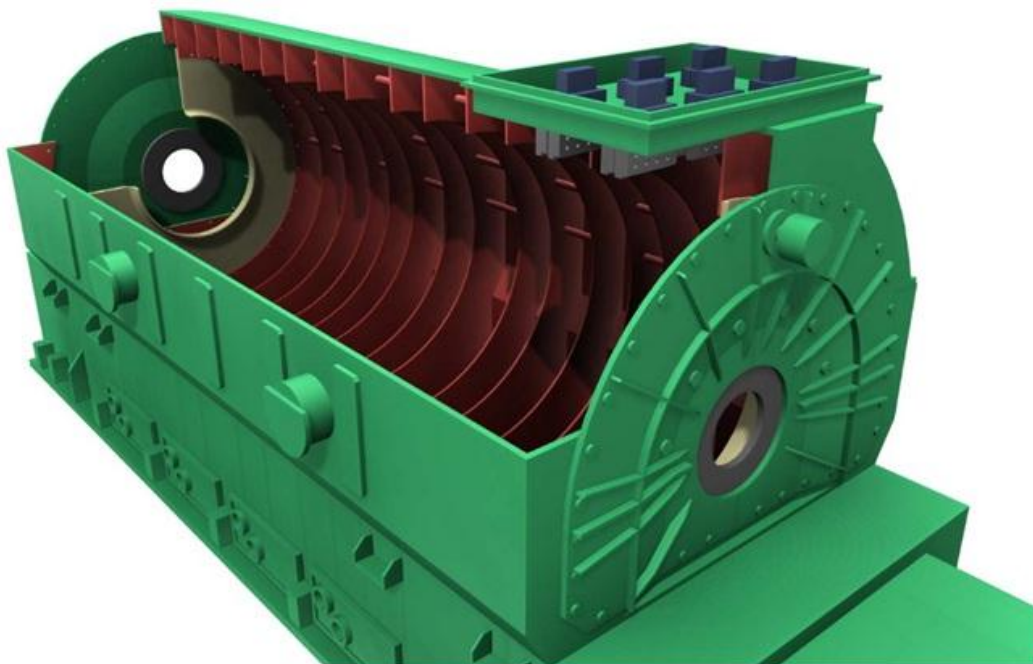
(Sumber : manual book kato engineering)



Turbin gas uap dan air biasanya memiliki “casing” sekitar baling-baling yang memfokus dan mengontrol fluida. “casing” dan baling-baling mungkin memiliki geometri variabel yang dapat membuat operasi efisien untuk beberapa kondisi aliran fluida.

## 2.7 Stator

Stator adalah bagian dari generator yang tidak ikut berputar (diam) yang terdiri dari rangka stator, inti stator, dan gabungan kawat pada bagian inti stator. Pada inti stator dibuat alur-alur dalam arah aksial dan pada alur tersebut ditempatkan kumparan stator. Dari kumparan stator dihasilkan arus bolak-balik tiga fasa.



**Gambar 2.14 Stator Generator**

(Sumber : rakhman.net)

Kumparan stator dibuat dari tembaga yang diisolasi. Inti stator menyalurkan medan magnet yang polaritasnya selalu berubah sesuai dengan



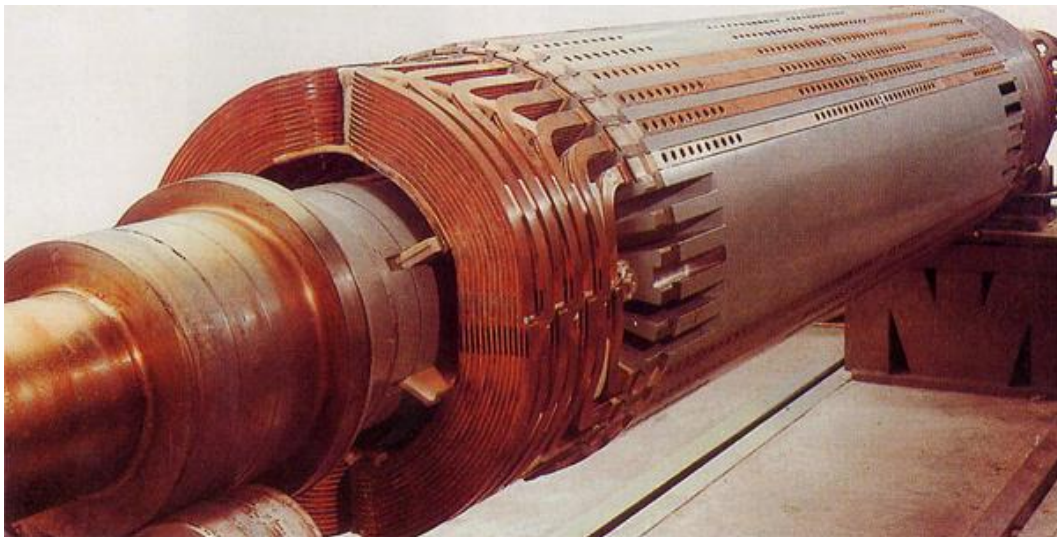


fungsi frekuensi arus bolak-balik (50 Hz). Untuk mengurangi arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain.

## 2.8 Rotor

Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Rotor terdiri dua bagian umum yaitu inti kutub dan kumparan medan.

Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan. Pada bagian medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada bagian inti harus benar – benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar. Tampilan rotor generator dapat dilihat pada gambar 2.9 dibawah ini :



**Gambar 2.15 Rotor Generator**

(Sumber : *asiantec.co.id*)



Rotor perakitan utama terpasang pada field. Ini terdiri dari gulungan dalam inti, yang pada gilirannya dipasang pada poros baja. Angker dari exciter perakitan dan permanen magnet generator (PMG) rotor juga dipasang pada poros seperti kipas (s) dan aksesoris opsional yang lainnya, inti terdiri dari laminasi, lembaran tipis dari baja listrik, yang ditumpuk bersama-sama. Inti membuat tiang menonjol. Lihat gambar 2.9 gulungan rotor terdiri dari isolasi kawat magnet luka di sekitar setiap tiang. V – blok atau spreader bar antara masing – masing tiang menjaga rotor gulungan di tempat. Gulungan damper terdiri dari tembaga atau aluminium batang yang dimasukkan melalui setiap permukaan tiang dan brazing untuk tembaga atau pelat aluminium peredam akhir pada setiap akhir laminasi stack.

## **2.9 Sistem Eksitasi<sup>4</sup>**

Sistem Eksitasi pada generator adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet yaitu apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga akan dihasilkan tegangan listrik bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor. Semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang akan dihasilkan oleh generator.

### **2.9.1 Metode Eksitasi Pada Generator AC**

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator AC, sistem eksitasi terdiri atas dua jenis yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (brush excitation) dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (brushless excitation). Ada dua jenis sistem eksitasi dengan menggunakan sikat yaitu :

1. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah)
2. Sistem eksitasi statis



Sedangkan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat terdiri dari :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan baterai
2. Sistem eksitasi dengan menggunakan Permanen Magnet Generator (PMG)

Untuk generator AC berkapasitas besar, penguat tanpa sikat digunakan untuk mensuplai arus searah ke belitan medan yang terdapat pada rotor mesin. Penguat tanpa sikat ini merupakan sebuah generator arus bolak-balik yang memiliki poros yang sama dengan generator AC. Generator penguat ini memiliki belitan medannya terdapat di stator, sedangkan belitan jangkarnya terdapat di rotor. Keluaran dari generator penguat ini disearahkan oleh penyearah kemudian disuplai pada rotor generator utama.

#### **2.9.1.1 Sistem Eksitasi Konvensional (Menggunakan Generator Arus Searah)**

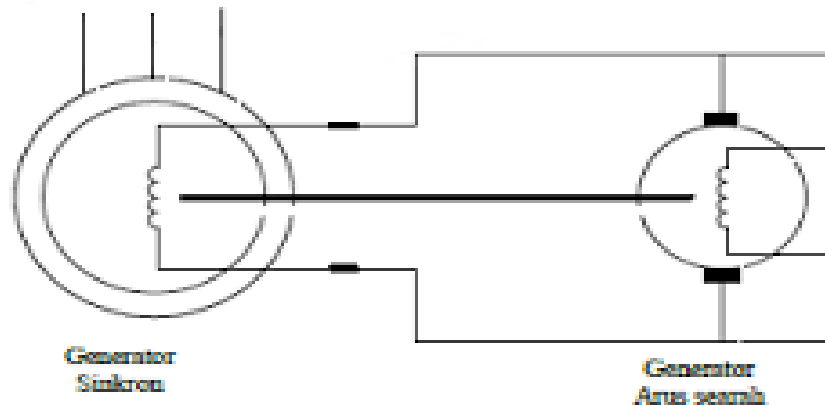
Untuk sistem eksitasi yang konvensional arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut eksiter. Generator AC dan generator arus searah tersebut terkopel dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator AC.

Tegangan yang dihasilkan oleh generator arus searah ini diberikan ke belitan rotor generator AC melalui sikat karbon dan slip ring. Akibatnya arus searah mengalir ke dalam rotor atau kumparan medan dan menimbulkan medan magnet yang diperlukan untuk dapat menghasilkan tegangan arus bolak-balik. Dalam keadaan ini bila generator diputar oleh penggerak mula maka dibangkitkan tegangan bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator generator AC.

Pada generator konvensional ini beberapa kerugian yaitu : Generator arus searah merupakan beban tambahan untuk penggerak mula. Penggunaan sling ring dan sikat menimbulkan masalah ketika digunakan untuk mensuplai sumber arus searah pada belitan medan generator sinkron. Terdapat sikat arang yang menekan slip ring sehingga menimbulkan timbul rugi gesekan pada generator utamanya. Selain itu pada generator arus searah juga terdapat sikat karbon yang menekan komutator. Selama pemakaian, slip ring dan sikat harus diperiksa secara teratur, generator arus searah juga memiliki keandalan yang rendah. Karena hal –hal seperti diatas dipikirkan hubungan lain dan dikembangkan apa yang dikenal



sebagai generator sinkron dengan *static exciter* (penguat statis). Gambar 2.16 adalah sistem eksitasi yang menggunakan generator arus searah.



**Gambar 2.16 Sistem Eksitasi Konvensional**

### 2.9.1.2 Sistem Eksitasi Statis

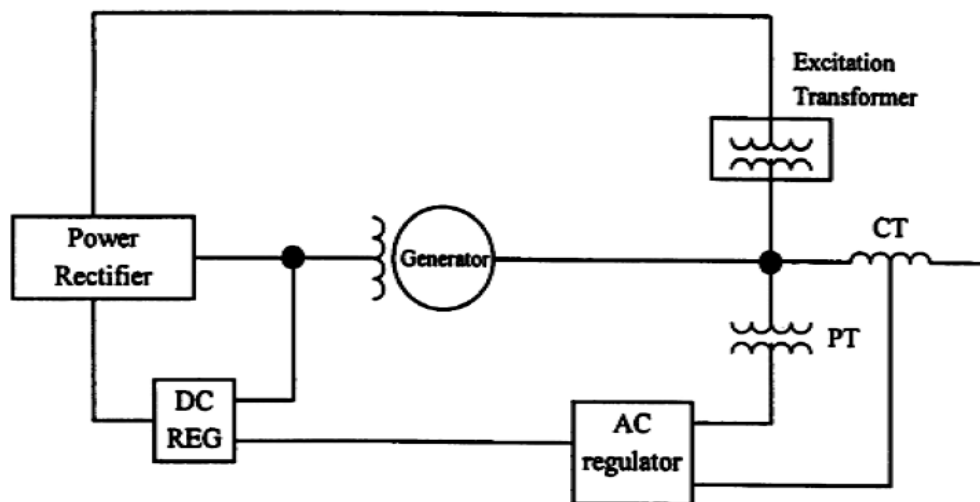
Sistem eksitasi statis menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (static), artinya peralatan eksitasi tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron.

Sistem eksitasi statis ( static excitation system) atau disebut juga dengan self excitation merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron. Sumber eksitasi pada sistem eksitasi statis berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah thyristor.

Pada mulanya pada rotor ada sedikit magnet sisa, magnet sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini kemudian masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali pada rotor, akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC akan naik demikian seterusnya sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut. Biasanya penyearah itu juga mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Bersama dengan penyearah blok tersebut sering disebut AVR.



Dibandingkan dengan generator yang konvensional generator dengan sistem eksitasi statis ini memang sudah jauh lebih baik yaitu tidak ada generator arus searah (yang keandalannya rendah) dan beban generator arus searah pada penggerak utama dihilangkan. Eksiter diganti dengan eksiter yang tidak berputar yaitu penyearah karena itu disebut eksiter statis. Gambar 2.17 berikut adalah sistem eksitasi statis.



**Gambar 2.17 Sistem Eksitasi Statis**

Untuk keperluan eksitasi awal pada generator AC, maka sistem eksitasi statis dilengkapi dengan field flashing. Hal ini dibutuhkan karena generator sinkron tidak memiliki sumber arus dan tegangan sendiri untuk mensuplai kumparan medan. Penggunaan slip ring dan sikat pada eksitasi ini menyebabkan sistem eksitasi ini tidak efisien dan efektif.

### 2.9.1.3 Sistem Eksitasi Menggunakan Baterai

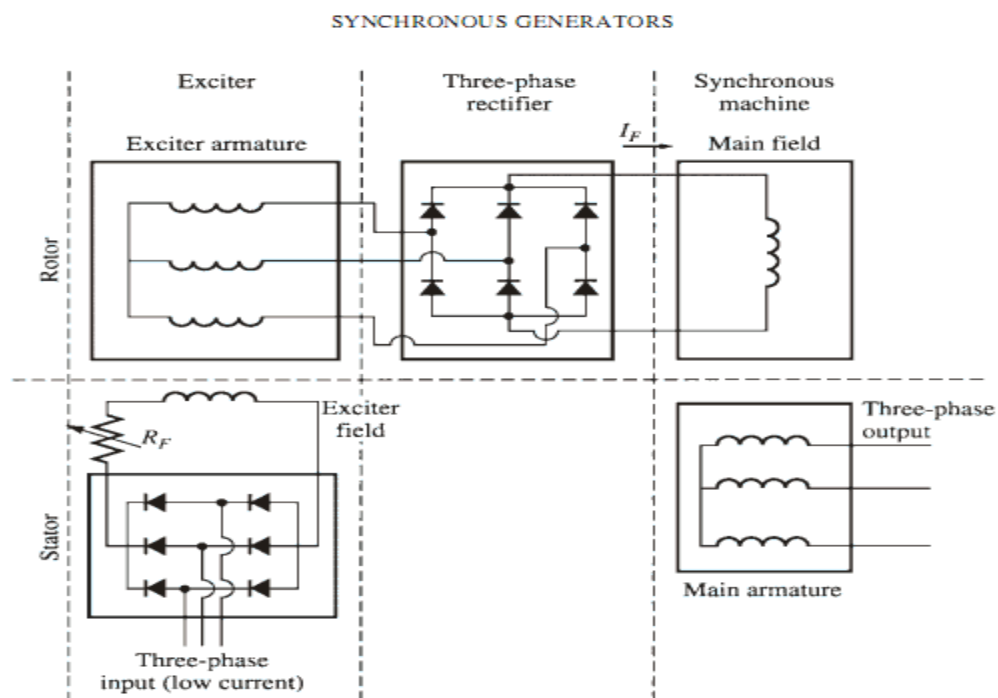
Sistem eksitasi tanpa sikat diaplikasikan pada mesin sinkron, dimana suplai arus searah ke belitan medan dilakukan tanpa melalui sikat. Arus searah untuk suplai eksitasi untuk awal start generator digunakan suplai dari baterai, yang sering dinamakan penguat mula, dimana arus ini selanjutnya disalurkan ke belitan medan ac exciter. Tegangan keluaran dari generator AC ini disearahkan oleh penyearah yang menggunakan dioda, yang disebut rotating rectifier, yang



diletakkan pada bagian poros ataupun pada bagian dalam dari rotor generator AC, sehingga rotating rectifier tersebut ikut berputar sesuai dengan putaran rotor.

Untuk menghindari adanya kontak geser pada bagian rotor generator AC, maka penguat medan generator dirancang sedemikian sehingga arus searah yang dihasilkan dari penyearah langsung disalurkan ke bagian belitan medan dari generator utama. Hal ini dimungkinkan karena dioda penyearah ditempatkan pada bagian poros yang dimiliki bersama-sama oleh rotor generator utama dan penguat medannya. Arus medan pada generator utama dikontrol oleh arus yang mengalir pada kumparan medan generator penguat (eksiter).

Setelah tegangan generator mencapai tegangan nominalnya maka catu daya DC (baterai) biasanya dilepas dan digantikan oleh penyearah. Penguatan yang dipakai adalah sistem self excitation sistem yaitu sistem dimana sumber daya untuk penguatnya diperoleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri. Gambar 2.18 menggambarkan sistem eksitasi tanpa sikat dengan suplai tiga fasa



**Gambar 2.18 Sistem Eksitasi Dengan Suplai Tiga Fasa**

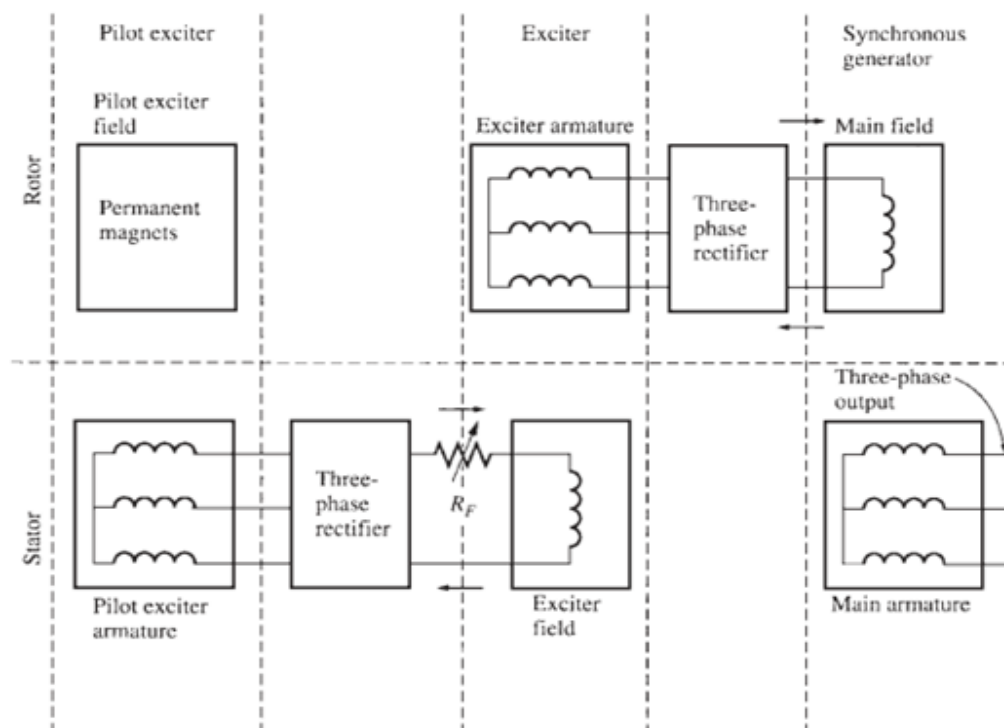
Pada gambar 2.18 untuk membangkitkan arus medan digunakan penyearah, dimana arus yang disearahkan di[peroleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri melalui transformator atau sering disebut eksitasi



transformator, berfungsi menurunkan tegangan keluaran generator untuk disuplai pada penyearah.

#### 2.9.1.4 Sistem Eksitasi Menggunakan Permanen Magnet Generator

Suatu generator AC harus memiliki sebuah medan magnet yang berputar agar generator tersebut menghasilkan tegangan pada statornya. Medan magnet ini dapat dihasilkan dari belitan rotor yang disuplai dengan sumber listrik arus searah. Cara lain untuk menghasilkan medan magnet pada rotor adalah dengan menggunakan magnet permanen yang diletakkan pada poros dari generator tersebut. Generator yang menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya ini disebut dengan Permanen Magnet Generator (PMG).



**Gambar 2.19 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan PMG**

Generator AC yang berkapasitas besar biasanya menggunakan sistem eksitasi brushless yang dilengkapi dengan permanen magnet generator. Hal ini dimaksudkan agar sistem eksitasi dari generator sama sekali tidak tergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin itu.



Dari gambar 2.19 bahwa pada bagian mesin yang berputar (rotor) terdapat magnet permanen, kumparan jangkar generator eksitasi, kumparan medan generator utama. Hal ini memungkinkan generator tersebut tidak menggunakan slip ring dan sikat dalam pengoperasiannya sehingga lebih efektif dan efisien.

## **2.10 Permanen Magnet Generator (PMG)**

Seperti halnya generator sinkron biasa, konstruksi PMG hampir sama dengan generator sinkron arus bolak-balik, kumparan jangkar diletakkan pada bagian stator dan kumparan medan digantikan oleh magnet permanen yang diletakkan dipermukaan atau ditanam di bagian rotor sehingga tidak memerlukan sumber eksitasi. Magnet yang diletakkan dipermukaan rotor dan generator dioperasikan pada kecepatan tinggi maka diperlukan alat penopang yang terbuat dari campuran baja atau *fiber carbon* yang menahan magnet permanen. Secara umum komponen permanen magnet generator terdiri dari stator, rotor dan magnet permanen.

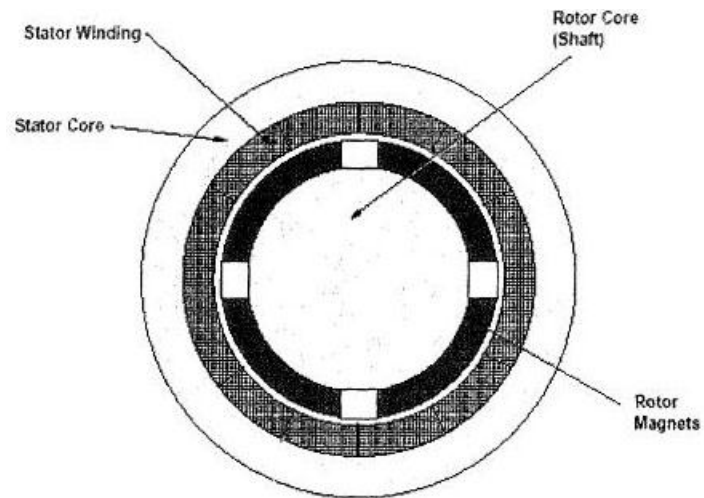
### **2.10.1 Stator**

Stator adalah bagian yang diam dari generator yang berfungsi sebagai tempat kumparan jangkar. Bentuk stator pada PMG terdiri dari dua yaitu : yang memiliki alur (slot) dan tanpa memiliki alur (slot).

#### **a. Stator Tanpa Menggunakan Alur**

Pada generator ini kumparan jangkar diletakkan di celah udara generator sehingga jumlah belitan lebih banyak karena ruang yang lebih besar, sehingga menghasilkan rugi-rugi konduktor yang rendah karena arus yang mengalir lebih sedikit pada setiap kumparan. Ruang kosong celah udara lebih besar dibandingkan dengan stator dengan menggunakan alur karena kumparan jangkar berada pada celah udara kerapatan fluksi berkurang, seperti pada gambar 2.20 berikut:

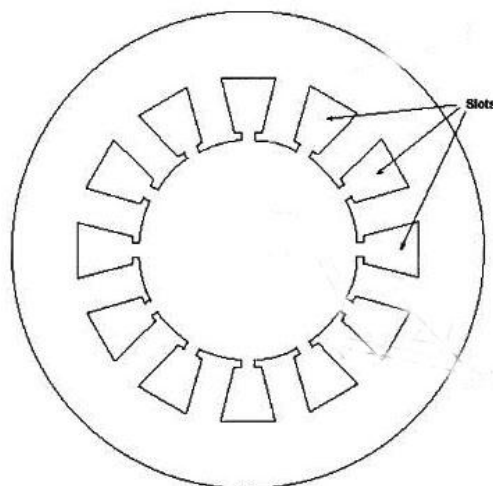




**Gambar 2.20 Stator Tanpa Menggunakan Alur**

b. Stator dengan Alur (Slot)

Alur berfungsi sebagai tempat meletakkan kumparan jangkar. Dengan menggunakan alur akan diperoleh jarak yang dekat antara kumparan dengan magnet untuk mengurangi kebocoran fluksi. Stator dengan menggunakan alur dapat dilihat pada gambar 2.21 Berikut ini:



**Gambar 2,21 Stator Dengan Menggunakan Alur**



### **2.10.2 Rotor**

Rotor adalah bagian yang berputar. Rotor merupakan tempat meletakkan magnet permanen, dimana pada inti rotor tersebut telah dibentuk ruang untuk meletakkan magnet permanen. Rotor terdiri dari sebuah permanen magnet generator seperti pada gambar 2.22 Berikut:

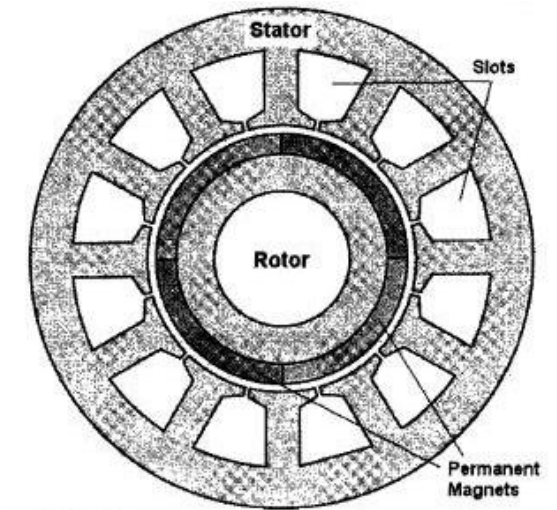


**Gambar 2.22 Rotor PMG**

### **2.10.3 Magnet Permanen**

Pada sistem eksitasi ini, sumber eksitasi dihasilkan oleh sebuah generator kecil dengan menggunakan Permanen Magnet Generator (PMG). Pilot eksiter merupakan generator yang memiliki magnet permanen. Oleh karena itu, generator ini sering disebut dengan Permanen Magnet Generator (PMG). Magnet permanen yang dimiliki oleh PMG ini terletak pada rotor sehingga apabila diputar akan memotong garis-garis gaya yang ada pada stator sehingga menimbulkan tegangan imbas pada stator. Tegangan imbas yang dihasilkan merupakan arus bolak-balik.

Rotornya merupakan sebuah magnet permanen yang terletak seporos dengan penguat utama dan generator utama. Sedangkan pada statornya terdapat belitan jangkar sebagai tempat dihasilkannya tegangan induksi dari magnet permanen yang berputar. Daya yang dihasilkan oleh PMG ini merupakan sumber eksitasi pertama yang disalurkan melalui AVR dan selanjutnya diteruskan ke pengeksitasi utama (eksiter utama).



**Gambar 2.23 Konstruksi PMG**

Pada saat generator belum beroperasi atau PMG belum berputar, rotor PMG telah menghasilkan fluks magnetik yang konstan. Hal ini disebabkan karena rotor dari PMG ini adalah magnet permanen. Fluks magnetik yang ditimbulkan oleh PMG tersebut akan diinduksikan pada kumparan jangkar (stator). Sehingga pada kumparan rotor tersebut akan dihasilkan fluksi magnet yang konstan. Namun pada stator tersebut belum dihasilkan tegangan induksi karena belum ada perubahan fluks terhadap waktu.

Magnet permanen apabila diputar fluks magnet akan memotong garis-garis gaya yang ada pada stator sehingga menimbulkan tegangan imbas pada stator. Tegangan imbas yang dihasilkan merupakan arus bolak-balik.

Pada saat generator diputar dari putaran nol sampai mencapai kecepatan nominal, maka pada rotor PMG akan dihasilkan medan putar. Medan putar ini akan diinduksikan pada stator. Sehingga pada stator tersebut akan dihasilkan fluks magnetic yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.



### 2.11 *Automatic Voltage Regulator (AVR)*

Tegangan yang dihasilkan oleh generator tidak selalu dihasilkan sesuai dengan ratingnya. Tegangan ini dapat turun atau lebih besar tergantung dengan jenis beban dan besarnya beban. Untuk beban induktif, tegangan pada generator dapat turun sehingga perlu menaikkan arus eksitasi yang diberikan, sedangkan untuk beban kapasitif, tegangan yang dihasilkan oleh generator dapat naik sehingga arus eksitasi diturunkan. Untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap maka perlu dilakukan penambahan atau pengurangan arus eksitasi. Pengaturan tegangan pada generator agar tegangan keluarannya tetap adalah dengan menggunakan suatu rangkaian pengatur tegangan yang terdiri dari beberapa rangkaian yang saling mendukung yang sering disebut dengan *Automatic Voltage Regulator (AVR)*. Jadi tugas utama dari AVR ini adalah :

- a. Untuk mengatur keluaran tegangan generator
- b. Untuk mengatur arus eksitasi
- c. Untuk mengatur Volt/Hert

### 2.12 *Rotating Diodes*

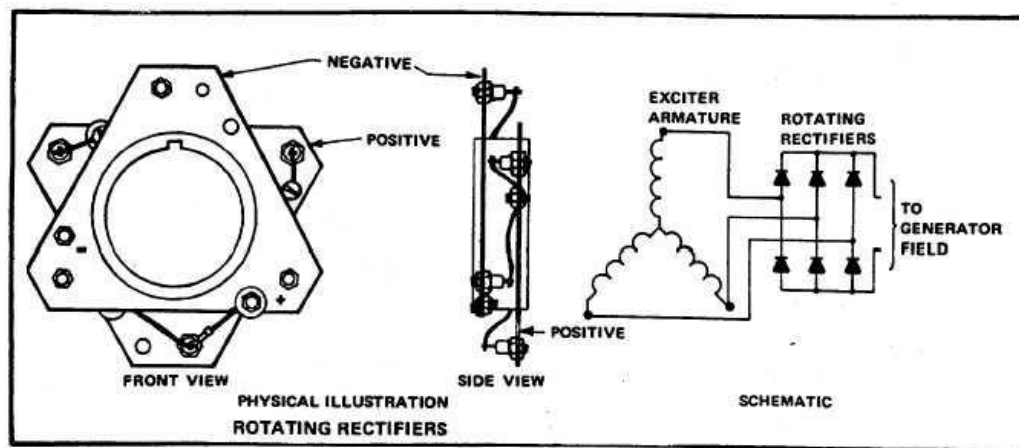
Keluaran dari eksiter disearahkan sebelum di suplai sebagai sumber eksitasi pada generator utama. *Rotating diodes* merupakan rangkaian penyearah gelombang penuh tiga fasa yang menyearahkan keluaran tegangan bolak-balik dari eksiter. Berdasarkan fungsi kerjanya, ada dua rangkaian penyearah yang digunakan pada *brushless exciter* yaitu : penyearah statis dan penyearah berputar.

Penyearah statis merupakan penyearah yang digunakan untuk menyearahkan arus bolak-balik yang dihasilkan oleh PMG untuk menyuplai eksiter. Penyearah statis merupakan jenis *thyristor rectifier*, dimana tegangan dapat diatur dengan mengatur arus penyalan yang diberikan.

Sedangkan penyearah berputar merupakan dioda yang digunakan untuk menyearahkan arus bolak-balik dari eksiter untuk menyuplai arus medan pada kumparan medan pada generator utama. Tegangan yang dihasilkan oleh kumparan medan (pada rotor). Eksiter disearahkan menggunakan dioda ini. Karena



kumparan medan generator utama terletak pada rotor maka dioda ikut berputar dengan poros generator sehingga disebut *rotating rectifier*.



**Gambar 2.24 Rotating Rectifier**

Pada dioda ini tidak ada pengontrolan tegangan sehingga pengontrolan tegangan yang dihasilkan oleh *rotating rectifier* diatur oleh *thyristor rectifier*. *Rotating diodes* ini terletak pada poros utama dan ikut berputar. Bagian utama dari *rotating diodes* ini adalah dioda silikon yang dipasang dengan kuat pada permukaan sebuah roda atau *wheel* berbentuk drum yang terbuat dari campuran baja berkekuatan tinggi. Rectifier wheel dipasang dengan kuat pada poros dan dapat menahan besarnya gaya rotasi dan torsi hubung singkat. Seperti pada gambar 2.24 diatas, pada rangkaian penyearah gelombang penuh tiga fasa ini ada enam buah dioda yang digunakan.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Pane Ennopati, *Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanen Magnet Generator* (Aplikasi Generator Sinkron di PLTD PT. Manunggal Wiratama) (Medan :2010)