

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Proses Produksi**

Pada proses di PLTU TJB Unit 1 dan Unit 2 Listrik dihasilkan dari Turbin sebagai penggerak atau *prime mover* yang digerakkan oleh uap yang dihasilkan dari Boiler, dengan tekanan 168 bar dan dengan suhu 538°C. Energi *enthalpy* dari uap dikonversikan menjadi energi mekanis pada turbin uap (*prime mover*) yang di kopel dengan generator. Turbin uap pada PLTU berkapasitas besar atau di atas 150 MW umumnya terdiri dari 3 *stage*, yaitu turbin tekanan tinggi, turbin tekanan menengah dan turbin tekanan rendah. Uap dari drum ketel mula-mula dialirkan ke turbin tekanan tinggi dengan terlebih dahulu melalui pemanas lanjut atau *superheater* agar uap menjadi kering. Setelah keluar dari turbin tekanan tinggi, uap dialirkan ke pemanas ulang atau *reheater* untuk menerima panas dari gas buang sehingga suhunya menjadi naik kembali, dari pemanas ulang, uap dialirkan ke turbin tekanan menengah. Keluar dari turbin tekanan menengah, uap langsung dialirkan ke turbin tekanan rendah. Turbin tekanan rendah umumnya merupakan turbin dengan aliran uap ganda dengan arah aliran yang berlawanan untuk mengurangi gaya aksial turbin. Dari turbin tekanan rendah, uap dialirkan ke kondensor untuk diembunkan. Kondensor memerlukan air pendingin untuk mengembunkan uap yang keluar dari turbin tekanan rendah, biasanya air pendingin ini diambil dari air sungai atau waduk atau air laut sebagai air pendingin kondensor dalam jumlah yang besar.

Setelah air diembunkan dalam kondensor ditampung di dalam *condensor hot well*, di dalam penampungan ini ada penambahan air untuk mengkompensasi kehilangan air yang terjadi karena kebocoran drain sistim maupun proses *soot blow* atau pembersihan kerak di pembakaran boiler. Air disini harus diolah atau ada perlakuan khusus agar memenuhi mutu yang diinginkan dari ketel uap atau boiler.

Mutu air ketel antara lain menyangkut kandungan NaCl, Cl, O<sub>2</sub> dan derajat keasaman (pH), kemudian air dari *condenser hot well* dipompakan kembali ke drum ketel uap kembali.

Generator yang di kopel dengan turbin uap, dengan sistim eksitasinya mengeluarkan tegangan sekitar 22.8 kV dan di naikkan melalui generator *transformer (transformer step-up)* menjadi tegangan keluaran 500 kV. Tegangan 500 kV ini kemudian di salurkan ke saluran interkoneksi Jawa-Bali melalui GI (Gardu Induk) SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi) di Ungaran Semarang Jawa Tengah.

## 2.2 Generator

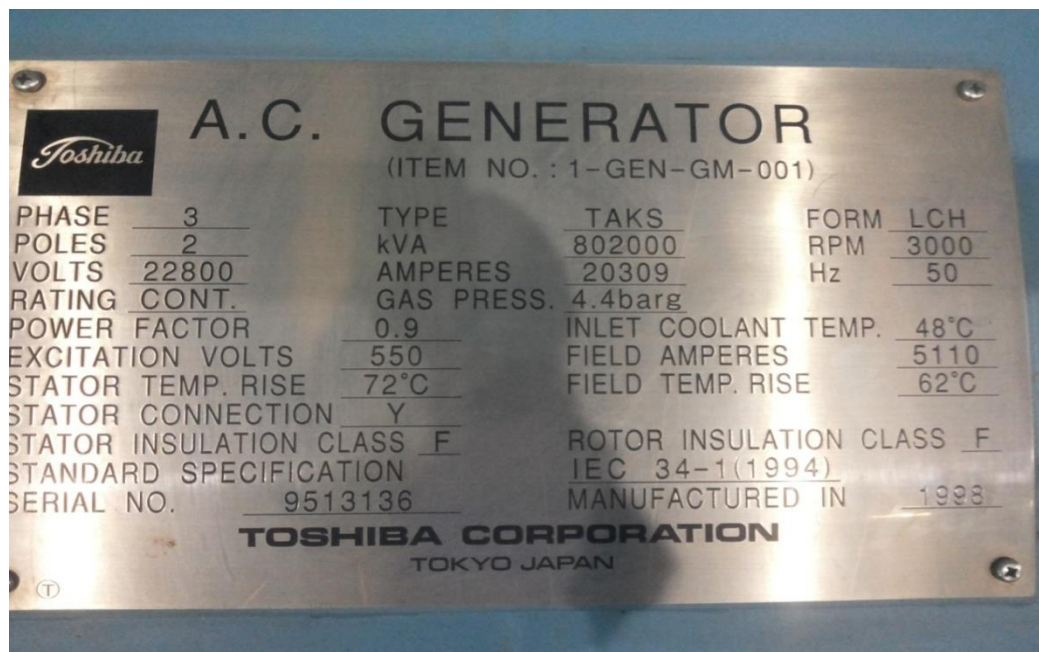
Generator adalah suatu mesin listrik yang berfungsi untuk mengubah tenaga mekanik mejadi tenaga listrik. Generator yang umumnya digunakan dalam pusat listrik adalah generator sinkron tiga fasa. Ujung-ujung kumparan stator dari generator dihubungkan ke penjepit pada generator sehingga ada enam penjepit. Penjepit-penjepit ini umumnya diberi kode R S T dan U V W. penjepit R dan U merupakan ujung-ujung kumparan Utama, penjepit S dan V dari kumparan ke-2, sedangkan dari kumparan ke-3 adalah T dan W. Karena umumnya generator sinkron dirangkaikan dalam hubungan Y, maka ketiga penjepit U V W dihubungkan jadi satu sebagai titik netral.

Tegangan generator di Tanjung Jati B maksimum adalah sekitar 22.8 kV (*sumber: SOP tanjung Jati B Unit 1, 2, 3 dan 4, 22Maret 2012*) dan dihubungkan dengan transformator untuk menaikkan tegangan menjadi 500 kV yang merupakan satu kesatuan dengan generatornya. Transformator penaik tegangan umumnya mempunyai hubungan  $\Delta$ -Y. Energi listrik yang dibangkitkan generator setelah tegangannya dinaikkan oleh transformator penaik tegangan disalurkan melalui Pemutus Tenaga (PMT) ke rel (*busbar*). Penyaluran daya dari generator sampai ke transformator penaik tegangan dilakukan menggunakan kabel pejal yang diletakkan pada saluran di atas tanah (*cable bus duct*). Setelah keluar dari sisi tegangan tinggi

transformator tersebut, energy disalurkan melalui konduktor tanpa isolasi ke PMT dan dari PMT ke rel yang juga melalui konduktor tanpa isolasi.

Saluran tenaga listrik dari generator sampai dengan rel harus rapi dan bersih agar tidak menimbulkan gangguan. Gangguan di bagian ini akan menimbulkan arus hubung singkat yang relative besar dan mempunyai resiko terganggunya pasokan tenaga listrik dari pusat listrik ke sistim, bahkan apabila generator yang digunakan dalam sistim berukuran besar, maka ada kemungkinan seluruh sistim akan terganggu.

Prinsip kerja dari generator sinkron atau *alternator* adalah rotor diberi masukan eksitasi arus DC dan diputar oleh *prime mover* (Turbin) sehingga menghasilkan medan magnet rotor. Fluks magnet yang dibangkitkan akan memotong konduktor pada stator. Sesuai dengan hukum *Faraday dan Lenz*, gaya gerak listrik (GGL) bolak balik akan diinduksikan pada konduktor jangkar statornya. Pada PLTU TJB Unit 1 dan Unit 2 generator menggunakan pabrikan merek Toshiba dari Jepang dengan spesifikasi sebagai berikut:



**Gambar 2.1** Name Plate Generator

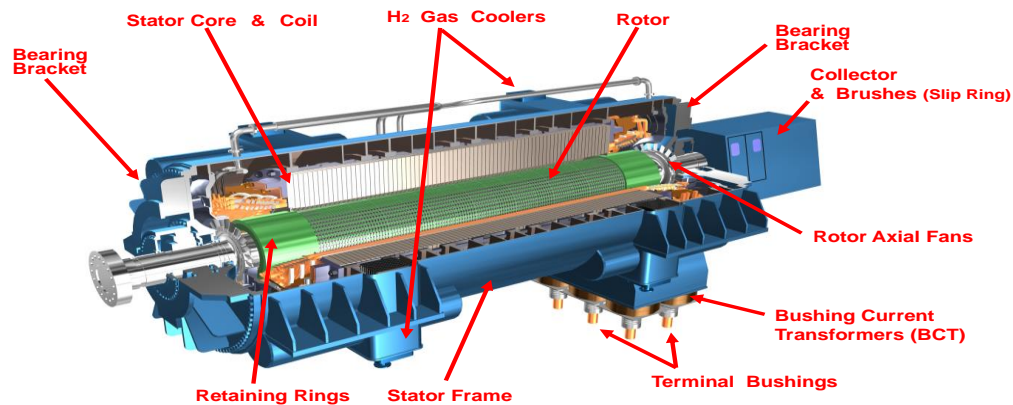
**TOSHIBA****GENERATOR RATINGS**

TYPE	ROTATING FIELD, CYLINDRICAL ROTOR, TOTALLY ENCLOSED, SYNCHRONOUS GENERATOR	
RATED CAPACITY	802000 kVA CONTINUOUS	
NO. OF PHASE	THREE (3) PHASE	
RATED FREQUENCY	50Hz	
NO. OF POLES	2	
RATED SPEED	3000 min	
RATED VOLTAGE	22.8kV	
RATED POWER FACTOR	0.9 LAGGING	
COOLING	STATOR WINDING	DIRECT WATER COOLED
	STATOR CORE	DIRECT H <sub>2</sub> COOLED
	ROTOR	DIRECT H <sub>2</sub> COOLED
INSULATION CLASS	CLASS F	
TEMPERATURE RISE	NOT EXCEED CLASS B	
SHORT CIRCUIT RATIO	NOT LESS THAN 0.5	
APPLIED STANDARD	IEC 34-1 (1994)	

5

This document is CONFIDENTIAL and is the INTELLECTUAL PROPERTY of TOSHIBA CORPORATION. It must not be copied, issued or transferred, nor must the information it contains be disclosed to any third party without their written permission.

Gambar 2.2 Generator Ratings

**TOSHIBA****CONSTRUCTION OF GENERATOR**

11

This document is CONFIDENTIAL and is the INTELLECTUAL PROPERTY of TOSHIBA CORPORATION. It must not be copied, issued or transferred, nor must the information it contains be disclosed to any third party without their written permission.

Gambar 2.3 Konstruksi Generator

Sistem pendinginan yang dipergunakan untuk rotor winding generator menggunakan gas Hydrogen dengan tekanan 4.4 bar dengan suhu Rotor maksimum 105°C alarm dan 110°C trip. Untuk Stator winding menggunakan air yang didinginkan dengan *Closed Cycle Cooling Water system* (CCCW) atau proses pendinginan air dengan system tertutup dengan suhu Stator maksimum 120°C (Sumber: *Nagamura,H, 2005, Specification for 802 MVA Generator*).

### **2.3 Sistem Pengukuran Generator**

Sistim pengukuran pada generator dan pada saluran adalah besaran yang secara umum diukur adalah sebagai berikut:

a. Tegangan

Tegangan yang diperlukan untuk menjaga mutu penyediaan tenaga listrik tidak boleh terlalu rendah dan untuk menjaga jangan sampai merusak isolasi, tegangan yang diperlukan ini tidak boleh terlalu tinggi.

b. Arus

Pengukuran arus diperlukan untuk mengamati perubahan berbagai alat, jangan sampai mengalami pembebanan lebih.

c. Daya Aktif

Daya aktif diukur dalam kW atau MW. Pengukuran ini diperlukan dalam kaitannya dengan kemampuan mesin penggerak generator dan pengaturan frekuensi.

d. Daya Reaktif

Daya reaktif diukur dalam kVAR atau MVAR. Pengukuran ini diperlukan dalam kaitannya dengan kemampuan generator penguat (sistim eksitasi) dan pengaturan tegangan.

e. Energi Listrik

Energi listrik diukur dalam KWh atau MWh. Pengukuran ini diperlukan untuk menyusun neraca energy dan berkaitan dengan pemakaian bahan bakar.

f. Sudut Fasa  $\cos \phi$

Alat ukur  $\cos \phi$  harus menunjukkan keadaan *lagging* atau *leading* sehingga dapat segera diketahui apakah generator memproduksi atau menyerap daya reaktif.

g. Frekuensi

Pengukuran frekuensi diperlukan untuk memparalelkan generator dan apabila sudah parallel, pengukuran frekuensi diperlukan untuk menjaga mutu penyediaan tenaga listrik.

Pengukuran-pengukuran tersebut memerlukan pengukuran arus dan tegangan secara langsung, kemudian ditransformasikan melalui transformator arus dan tegangan, untuk selanjutnya dimasukkan ke alat-alat pengukur. (Sumber: *Djiteng Marsudi, 2011, Pembangkitan Energi Listrik Edisi kedua*)

## 2.4 Sistem Proteksi Generator

Dalam melaksanakan pembangkitan gangguan tidak dapat dihindari. Gangguan kebanyakan merupakan hubung singkat antar fasa atau antara fasa dengan tanah dan keduanya. Gangguan hubung singkat semacam ini menimbulkan arus yang besar yang dapat merusak peralatan sehingga diperlukan system proteksi untuk mengamankan peralatan tersebut. Arus yang mengalir ke *trip coil* (TC) adalah arus searah dari baterai aki. Baterai aki ini mempunyai peran penting dalam system proteksi, maka untuk menjaga keandalan system proteksi, baterai aki ini harus dipelihara dengan baik.

Alat pendeteksi gangguan adalah relai. Relai kemudian memberi perintah kepada *trip coil*, yaitu kumparan yang apabila bekerja akan menggerakkan

pembukaan PMT (Pemutus Tenaga), sehingga PMT membebaskan tegangan dari bagian instalasi yang terganggu, di mana arus gangguan hubung singkat yang terjadi yang dapat merusak peralatan telah dihilangkan.

Relai-relai yang digunakan untuk proteksi generator dibagi menjadi dua yaitu:

a. Relai-relai untuk Generator

1. Relai Arus Lebih

Relai ini berfungsi mendeteksi arus lebih yang mengalir dalam kumparan stator generator. Arus yang berlebihan dapat terjadi pada kumparan stator generator atau di dalam kumparan stator. Arus yang berlebihan dalam kumparan stator dapat juga terjadi karena pembebanan yang berlebihan terhadap generator.

2. Relai Diferensial

Relai ini berfungsi mendeteksi gangguan dalam kumparan stator generator dan harus bekerja lebih cepat daripada relai arus lebih tersebut agar ada selektivitas. Prinsip kerja relai ini adalah membandingkan arus yang masuk dan keluar dari kumparan stator generator. Apabila ada selisih, berarti ada gangguan dalam kumparan stator generator. Selisih arus yang terdeteksi inilah yang mengoperasikan relai diferensial.

3. Relai Gangguan Hubung Tanah

Gangguan hubung tanah adalah gangguanyang paling banyak terjadi. Arus gangguan hubung tanah yang terjadi belum tentu cukup besar untuk dapat mengerjakan relai arus lebih. Oleh sebab itu, harus ada relai arus hubung tanah yang harus dapat mendeteksi adanya gangguan hubung tanah. Prinsip kerja relai arus hubung tanah adalah mendeteksi arus urutan nol, karena setiap gangguan hubung tanah menghasilkan arus urutan nol.

Relai gangguan hubung tanah ini dipasang pada sirkuit stator yang pada umumnya relai hubung tanah pada sirkuit tiga fasa yaitu dengan menjumlahkan melalui transformator arus ketiga fasa yang ada. Kalau tidak ada gangguan hubung tanah jumlah ini sama dengan 0, tapi kalau ada gangguan hubung tanah jumlah ini tidak sama dengan 0 lalu relai akan bekerja. Jadi relai ini akan mendeteksi gangguan hubung tanah yang terjadi pada sirkuit yang terhubung dengan sirkuit stator dari generator.

#### 4. Relai Rotor Hubung Tanah

Hubung tanah dalam sirkuit rotor, yaitu hubung singkat antara konduktor rotor dengan badan rotor di mana dapat menimbulkan distorsi medan magnet yang dihasilkan rotor dan selanjutnya dapat menimbulkan getaran (*vibration*) berlebihan dalam generator. Oleh karena itu, hal ini harus dihentikan oleh relai rotor hubung tanah. Karena sirkuit rotor adalah sirkuit arus searah, maka relai rotor hubung tanah pada prinsipnya merupakan relai arus lebih untuk arus searah.

#### 5. Relai Penguatan Hilang / Relai Eksitasi Rendah

Penguatan yang hilang dapat menimbulkan pemanasan berlebihan pada kepala kumparan stator. Selain itu penguatan generator sinkron yang lemah dapat menyebabkan generator menjadi lepas dari hubungan sinkron dari generator lainnya. Dalam keadaan lepas sinkron, generator yang penguatannya lemah masih diberi kopel pemutar oleh mesin penggerak sehingga generator ini berubah menjadi generator asinkron. Keadaan ini akan menimbulkan pemanasan yang berlebihan pada rotor generator sinkron ini, karena tidak direncanakan untuk beroperasi asinkron. Oleh sebab itu, keadaan ini harus dicegah oleh relai penguatan hilang. Prinsip kerja relai ini adalah mengukur impedansi kumparan stator generator. Dalam keadaan penguatan yang



hilang, impedansi kumparan stator akan terlihat kecil dan relai penguatan hilang ini akan bekerja.

#### 6. Relai Tegangan Lebih

Tegangan lebih dapat terjadi apabila generator dalam keadaan berbeban, kemudian pemutus tenaganya (PMT) akan membuka (*trip*) karena salah satu atau beberapa relai bekerja. Tegangan lebih ini dapat merusak isolasi generator termasuk kabel-kabel penghubungnya. Oleh karena itu, keadaan ini harus dicegah dengan menggunakan relai tegangan lebih. Prinsip kerjanya adalah mendeteksi tegangan antar fasa melalui transformator tegangan. Apabila tegangan ini melampaui batas tertentu, maka relai ini akan men-*trip* (membuka) PMT generator dan PMT medan penguat magnet generator.

#### 7. Relai Arus Urutan Negatif

Sambungan yang longgar dan beban yang tidak simetris dapat menimbulkan arus urutan negatif dan selanjutnya menimbulkan pemanasan yang berlebihan dalam rotor. Relai arus urutan negatif berfungsi untuk mencegah hal ini. Relai arus urutan negatif ini adalah relai digital yang bekerja atas dasar proses numeric.

#### 8. Relai Suhu

Suhu kumparan stator dan suhu bantalan generator perlu dipantau. Hal ini diperlukan karena bila suhu berlebihan, maka kumparan stator maupun bantalan generator bisa rusak. Oleh karena itu, kerusakan ini harus dicegah oleh relai suhu yang mula-mula membunyikan alarm pada suhu tertentu, kemudian pada suhu yang lebih tinggi lagi relai ini men-*trip* (membuka) PMT dan generator. Prinsip kerja relai ini adalah menggunakan tegangan yang yang dihasilkan oleh *thermocouple* yang ditempatkan pada kumparan stator dan dari suhu pada kumparan rotor yang dihasilkan dari perhitungan antara *field voltage* dan *field current* pada masukan generator dari eksiter.

### 9. Relai Fluks Berlebih (*Over Flux Relay*)

Relai ini diperlukan untuk mencegah terjadinya fluks magnetic yang berlebihan dalam stator generator, karena hal ini bisa menimbulkan arus pusar dan rugi histerisis yang besar pada dalam stator, sehingga timbul pemanasan yang berlebihan dalam stator generator. Fluks magnetik yang berlebihan ini bisa terjadi pada proses start up unit PLTU yang memakan waktu lama. Putaran generator dinaikkan sedikit demi sedikit sebelum mencapai putaran nominal yaitu 3000 rpm, apabila tegangan telah mencapai nilai nominal maka ini berarti terjadi fluks magnetic yang berlebihan, karena tegangan generator adalah sebanding dengan jumlah putaran per menit dan juga sebanding dengan *fluks magnetic*.

#### b. Relai-relai untuk Mesin Penggerak Generator

Gangguan mekanis pada mesin penggerak generator ada kalanya memerlukan pencegah/proteksi yang memerlukan *trip*-nya (membukanya) PMT generator. Gangguan semacam ini misalnya adalah:

##### 1. Suhu Bantalan Terlalu Tinggi

Yaitu pada bantalan generator.

##### 2. Suhu air pendingin terlalu tinggi

Suhu air pendingin generator harus selalu dipantau dan diamankan dengan relai suhu yang member alarm atau signal peringatan yang kemudian akan men-*trip* (membuka) PMT generator serta menghentikan mesin penggerak generator. Hal ini diperlukan karena suhu air pendingin yang terlalu tinggi dapat merusak peralatan yang diinginkannya terutama pada kumparan stator dari generator.

##### 3. Tekanan Minyak pelumas Rendah

Tekanan minyak pelumas rendah bagi semua macam mesin penggerak generator akan membahayakan bantalannya. Disamping itu pada generator yang menggunakan pendinginan rotor dengan sistim

Hidrogen, tekanan minyak pelumas didalam sistim generator seal oil tekanan minyak oilnya juga harus selalu dipantau. Oleh karena itu, perlu diamankan dengan relai tekanan minyak pelumas rendah. Relai ini terlebih dahulu member alarm peringatan yang kemudian men-*trip* (membuka) PMT generator dan menghentikan mesin penggeraknya. (Sumber: *Djiteng Marsudi, 2011, Pembangkitan Energi Listrik Edisi kedua*)

## 2.5 Mains Rotor

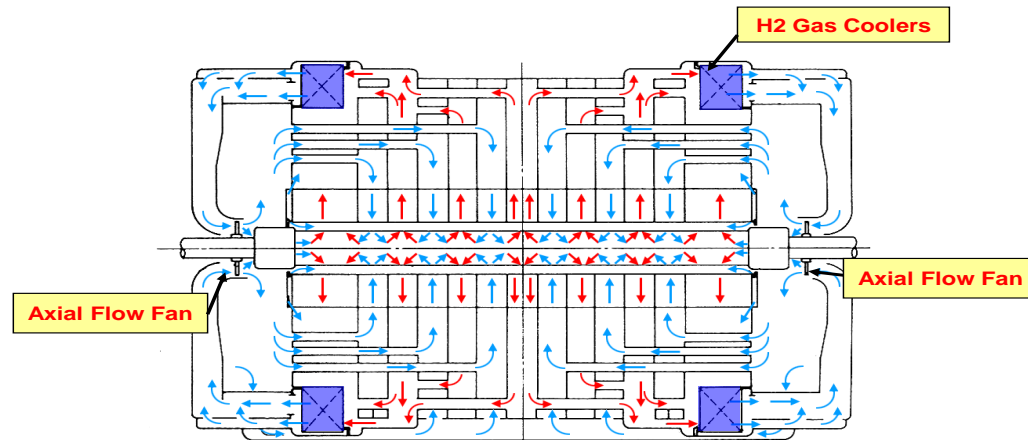
Mains rotor adalah bagian dinamis dari generator, yaitu sebagai bagian yang berputar yang memberikan perubahan garis-garis gaya magnet terhadap permukaan inti stator. Mains rotor ini terdiri dari inti besi yang membentuk sepatu kutub yang didalamnya terdapat kumparan magnet yang akan membentuk kutub utara dan kutub selatan. Konstruksi mains rotor harus kokoh karena mempunyai bagian yang selalu berputar, bagian yang berputar akan mempunyai gaya tekanan keluar (sentrifugal), untuk itu bisa dilihat bahwa sambungan dan ikatan pada mains rotor terlihat sangat kokoh.



**Gambar 2.4** Mains Rotor

**TOSHIBA**

## STATOR AND ROTOR COOLING FLOW PATH



20

This document is CONFIDENTIAL and is the INTELLECTUAL PROPERTY of TOSHIBA CORPORATION. It must not be copied, stored or transferred, nor must the information it contains be disclosed to any third party without their written permission.

**Gambar 2.5** Proses Pendinginan Rotor dengan Gas Hidrogen

Pada skema diatas Generator yang berpendinginan hidrogen, hidrogen disirkulasikan ke seluruh sisi kumparan generator baik sisi rotor maupun stator. Sebuah kipas aksial yang terpasang satu shaft dengan generator bertugas mensirkulasikan hidrogen tersebut agar terus berputar menjangkau segala sisi generator. Namun demikian aliran hidrogen tidak menjangkau sisi dalam kumparan rotor, ia hanya mendinginkan sisi luarnya saja, sehingga bisa dikatakan kumparan stator didinginkan hanya secara tak langsung (*indirect cooler*). Hidrogen yang telah menyerap panas akan melewati *heat exchanger* yang akan membuang panas dari hidrogen ke luar sistem melalui media air. (Sumber: Nagamura, H, 2005, *Specification for 802MVA Generator dan Wikipedia: Hydrogen Cooled Generator, Electrical Engineering Design*).

## 2.6 Mains Stator

Stator generator adalah bagian statis dari generator yang merubah perubahan garis-garis gaya magnet yang melaluinya menjadi sumber tegangan atau

mengeluarkan tegangan. Didalam stator generator terdapat belitan-belitan penghantar yang disusun sedemikian rupa sesuai kaidah baik jumlah lilitan, jarak antara lilitan (*pitch factor*) dan beda sudut antar phase, sehingga menghasilkan tegangan 3 phase yang mempunyai sudut  $120^\circ$  terhadap phase lainnya. Kemampuan dan kualitas generator ditentukan juga oleh bahan inti besi dan bahan tembaga yang dipakai serta tingkat ketahanan isolasi terhadap panas yang melaluinya. Bahan inti dari stator merupakan bahan terpilih yang mempunyai tingkat permeabilitas magnetik yang tinggi, terbentuk dari lapisan-lapisan plat yang terlaminasi satu sama lain. Hal ini adalah dimaksudkan untuk mengurangi rugi besi karena rugi arus hysteresis yang berpusar dalam inti besi. Demikian juga dengan lilitan tembaga atau kawat email mempunyai kualitas yang khusus disamping biasanya mempunyai lapisan isolasi (email) yang double atau ganda. Juga mempunyai ketahanan yang tinggi sampai  $150^\circ\text{C}$  sehingga tahanan isolasi masih cukup kuat untuk menahan panasnya stator generator maupun arus lilitan itu sendiri



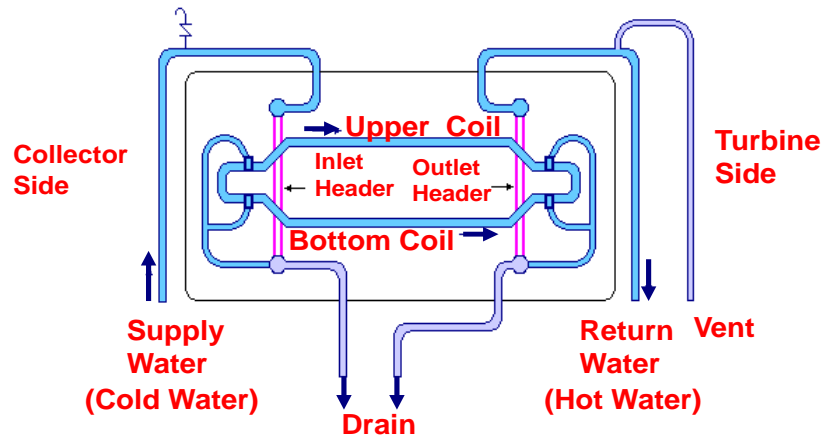
**Gambar 2.6** Mains Stator

**Tabel 2.1** *Parameter Generator Stator Water Cooling.*

Item		Unit	Normal	Alarm	Trip
Stator Water Temperature	Generator Inlet	°C	40 - 48		
	Generator Outlet	°C	70 - 78	Normal + 10	95
Stator Water Level in Storage Tank		mm	Gauge glass indication	Normal ±100	
Stator Water Conductivity	Generator Outlet	µS/cm	< 0.3	0.5	9.9
	Generator Inlet	µS/cm	< 0.3	0.5	9.9
	Deionizer Outlet	µS/cm	< 0.3	0.5	9.9

**TOSHIBA**

**STATOR WINDING COOLING WATER FLOW**



The Inlet Temperature Is 40 to 46 Degrees C and Conductivity at the Temperature of 25 Degrees C Is Below 50 Micro-Siemens / Meter.

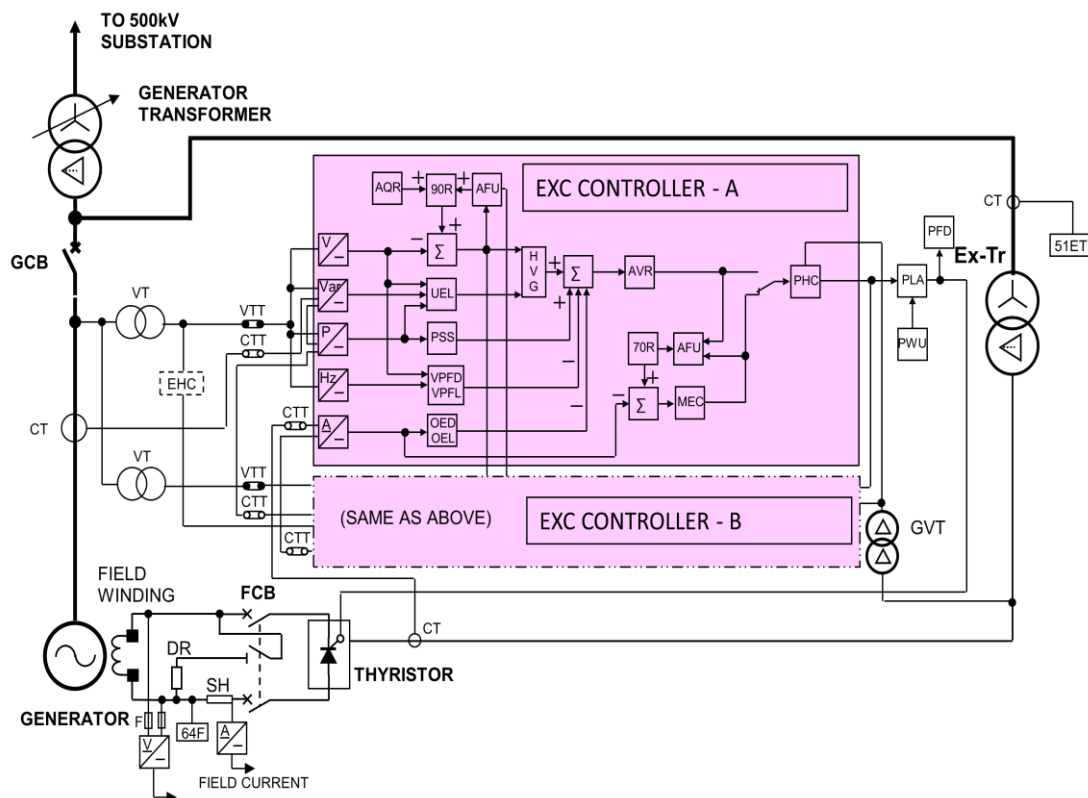
This document is CONFIDENTIAL and is the INTELLECTUAL PROPERTY of TOSHIBA CORPORATION. It must not be copied, loaned or transferred, nor must the information it contains be disclosed to any third party without their written permission.

**Gambar 2.7** Proses Pendinginan Mains Stator

Pada gambar di atas untuk generator berpendinginan hidrogen dan air, mereka berbagi tugas sehingga hidrogen menjadi media pendingin rotor sedangkan air bertugas mendinginkan kumparan stator. Pada sisi stator pendinginan air mampu menjangkau seluruh bagian dalam kumparan *core stator*. (Sumber: Nagamura, H, 2005, *Specification for 802 MVA Generator*).

## 2.7 Exciter atau Sistem Eksitasi

Exciter adalah bagian generator yang berfungsi untuk pembangkitan tegangan sebagai sumber arus mains rotor untuk pembentukan kutub. Exciter ini terdiri dari Exciter stator dan Exciter rotor. Exciter stator dapat sumber dari AVR sedangkan Exciter rotor mengeluarkan tegangan untuk arus kutub mains rotor. Adapun sistem konfigurasi dari Excitasi control adalah sebagai berikut:



**Gambar 2.8** Skema Exciter System

**Tabel 2.2** Spesifikasi dari Generator Eksitasi

No	Item	Specification
1	Generator rating	2P-802MVA-3000RPM-22800V-50Hz-0.85PF
2	Thyristor rating	2297.5kW-550V-5450A 1S-6P-6A
3	Applicable standard	IEC
4	Excitation system	Thyristor excitation system
5	Voltage setting range	90%-110% of the generator rated voltage
6	Overall voltage variation	Within $\pm 0.5\%$
7	Environment in which to install	Ambient temperature: 0-40°C (AVR cubicle). 0-40°C (THY, FCB cubicle) Relative humidity: 5-95%
8	Insulation resistance	2M Ohms / cubicle using a DC 500v megger
9	Withstand voltage	Control circuit: AC 2000V for 1 minute Field circuit: According to IEC standard
10	Paint colour	Outside surface : 5Y7/1 (semi gloss) Inside surface : 5Y7/1 (semi gloss) Instrument : N1.5 (semi gloss) Components mounted inside: supplier's standard
11	VT input	VT rating: 22800V / 110V Burden : 6VA or less (for each phase)
12	CT input	CT rating : 25000A / 5A Burden : 3VA or less (for each phase)
13	AC control power	Rated voltage : 220V Voltage variation range : $\pm 10\%$ Burden : 15A or less
14	DC control power	Rated voltage : 125V Voltage variation range : 112V - 137V Burden : 10A or less



**Tabel 2.3** Fungsi Kontrol dari Sistim Eksitasi

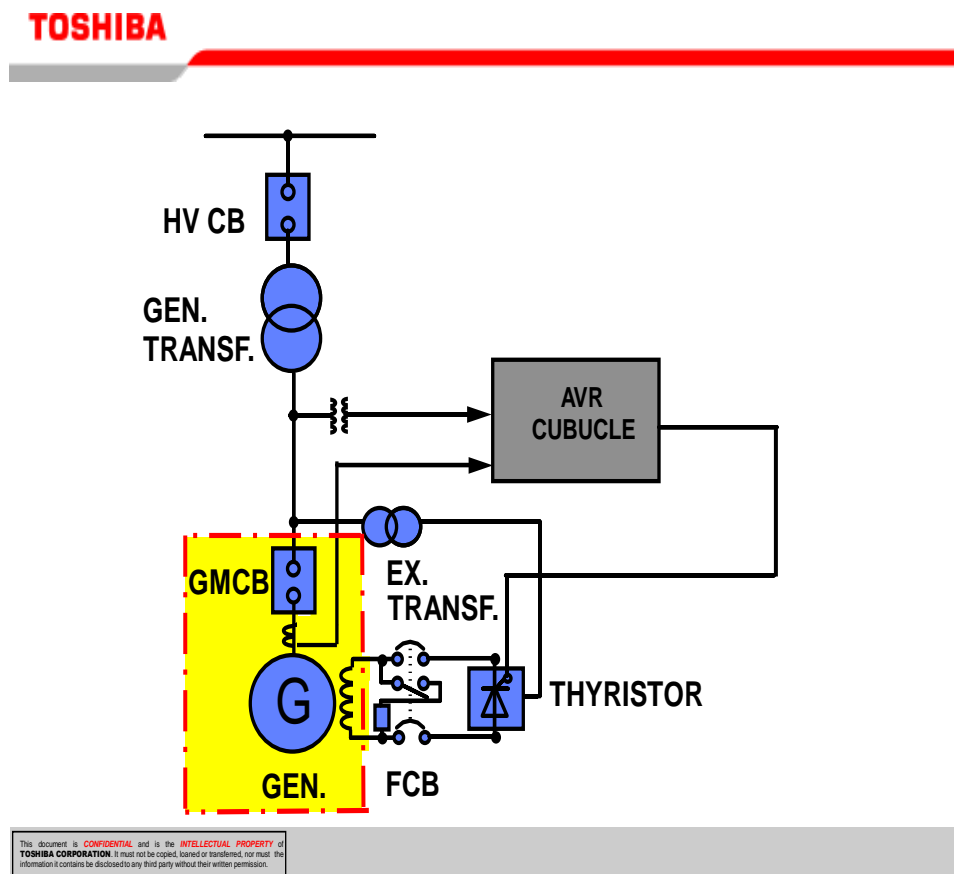
<b>FUNCTIONS</b>	<b>DESCRIPTION</b>
<b>AVR</b> (Automatic Voltage Regulator)	To adjust the terminal voltage by automatic voltage regulator (90R).
<b>MEC</b> (Manual Excitation Controller)	To adjust the field current by manual voltage regulator (70R)
<b>OEL</b> (Over Excitation Limiter)	To prevent the generator from phase-delay operation under high field current.
<b>UEL</b> (Under excitation limit)	To prevent the generator from phase-lead operation under low field current.
<b>VPFL</b> (V/F Limiter)	To limit the over-fluxing of the generator and the generator transformer.
<b>PSS</b> (Power System Stabilizer)	To add a stabilizing signal to AVR.
<b>AFU</b> (Automatic Follow-up of 90R)	To make 90R of the standby system following that of working system.

Setelah generator AC mencapai kecepatan yang sebenarnya oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan medan-nya dieksitasi dari catu DC atau dari sistim eksitasi kontrol. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan GGL (Gaya Gerak Listrik) kepadanya. GGL yang dibangkitkan adalah GGL bolak balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah secara terus menerus melewati konduktor tersebut. GGL yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator. Besarnya GGL yang dibangkitkan tergantung pada laju pemotongan garis gaya atau pada kuat medan dan kecepatan rotor. Karena generator kebanyakan bekerja pada kecepatan konstan, maka besarnya GGL yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Di PLTU Tanjung Jati B Unit 1 dan Unit 2 sistim Eksitasi menggunakan Thyristor, dimana sistim ini mempunyai beberapa kelebihan yaitu:

1. Mempunyai respon yang cepat seiring kemampuan Governor pada Turbin.
2. Memiliki batasan arus eksitasi yang tinggi.
3. Sumber tegangan diambil langsung dari generator.

## 2.8 Automatic Voltage Regulator (AVR).

Adalah bagian dari generator yang berfungsi mengatur, mengontrol dan memonitor tegangan yang keluar dari mains stator berdasarkan prinsip umpan balik atau feed back dimana output dimonitor untuk mengontrol input supaya terjadi keseimbangan antara tegangan keluar dengan tegangan reference, sehingga tegangan yang keluar dari generator selalu konstan dengan berbagai level beban.



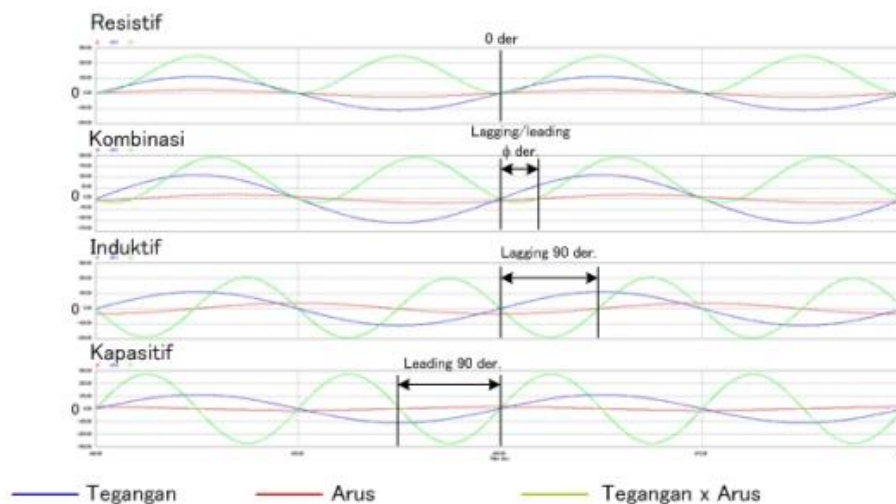
**Gambar 2.9** Skema Automatic Voltage Regulator (AVR)

(Sumber: *Excitation and Generator Control System Instruction Manual by Toshiba Corporation*).

## 2.9 Faktor Daya dan Reaktif Kurva Capability

Sistim listrik menggunakan sumber tegangan berbentuk sinusoidal murni dan beban linier. Beban linier adalah beban yang menghasilkan bentuk arus sama dengan bentuk tegangan. Pada kasus sumber tegangan berbentuk sinusoidal murni, beban linier mengakibatkan arus yang mengalir pada jaringan juga berbentuk sinusoidal murni. Beban linier dapat diklasifikasikan menjadi 4 macam yaitu:

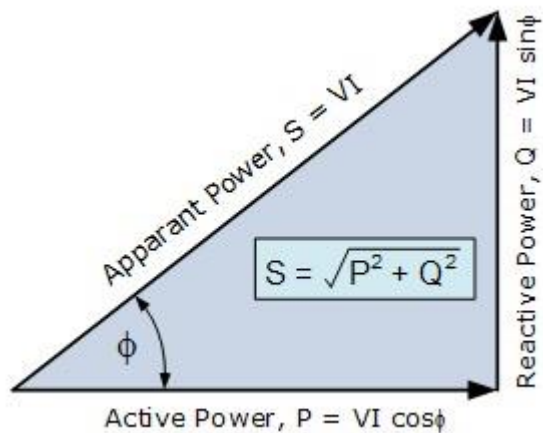
1. Beban Resistif dicirikan dengan arus yang sefase dengan tegangan.
2. Beban Induktif dicirikan dengan arus yang tertinggal terhadap tegangan sebesar  $90^\circ$ .
3. Beban Kapasitif dicirikan dengan arus yang mendahului terhadap tegangan sebesar  $90^\circ$ .
4. Beban Kombinasi merupakan kombinasi dari ketiga beban diatas dicirikan dengan arus yang tertinggal / mendahului tegangan sebesar sudut  $\phi$ .



**Gambar 2.10** Gelombang Arus dan Tegangan Listrik AC

Pada listrik daya bisa diperoleh dari perkalian antara tegangan dan arus yang mengalir, perkalian antara keduanya akan menghasilkan daya nyata (apparent power)

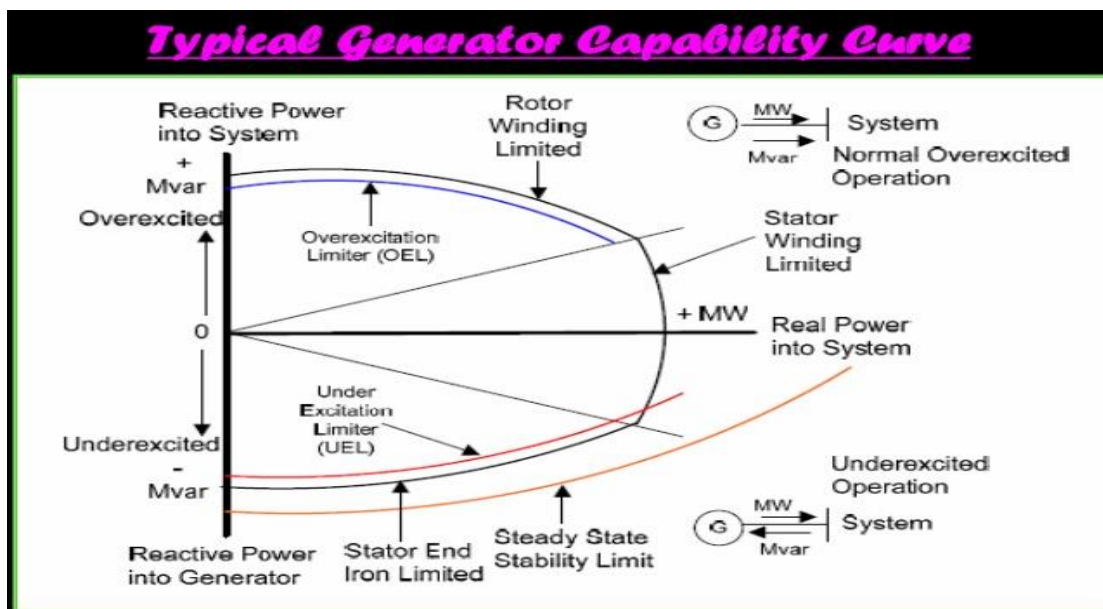
satuan Volt-Ampere (VA) yang memiliki dua buah bagian. Bagian pertama adalah daya yang dimanfaatkan oleh konsumen, bisa menjadi gerakan pada motor, bisa menjadi panas pada elemen pemanas dan sebagainya, daya yang dimanfaatkan ini sering disebut sebagai daya aktif (*real power*) memiliki satuan watt (W) yang mengalir dari sisi sumber ke sisi beban bernilai rata-rata tidak nol. Bagian kedua adalah daya yang tidak dimanfaatkan secara langsung oleh konsumen, namun hanya ada di jaringan, daya ini disebut dengan daya reaktif (*reactive power*) memiliki satuan Volt-Ampere-Reactive (VAr) bernilai rata-rata nol. Pada ilmu kelistrikan semua bergantung pada kondisi jaringan, daya nyata yang diberikan oleh sumber tidak semuanya bisa dimanfaatkan oleh konsumen sebagai daya aktif, dengan kata lain terdapat porsi daya reaktif yang merupakan bagian yang tidak dimanfaatkan secara langsung oleh konsumen. Rasio besarnya daya aktif yang bisa kita manfaatkan terhadap daya nyata yang dihasilkan sumber inilah yang disebut Faktor daya.



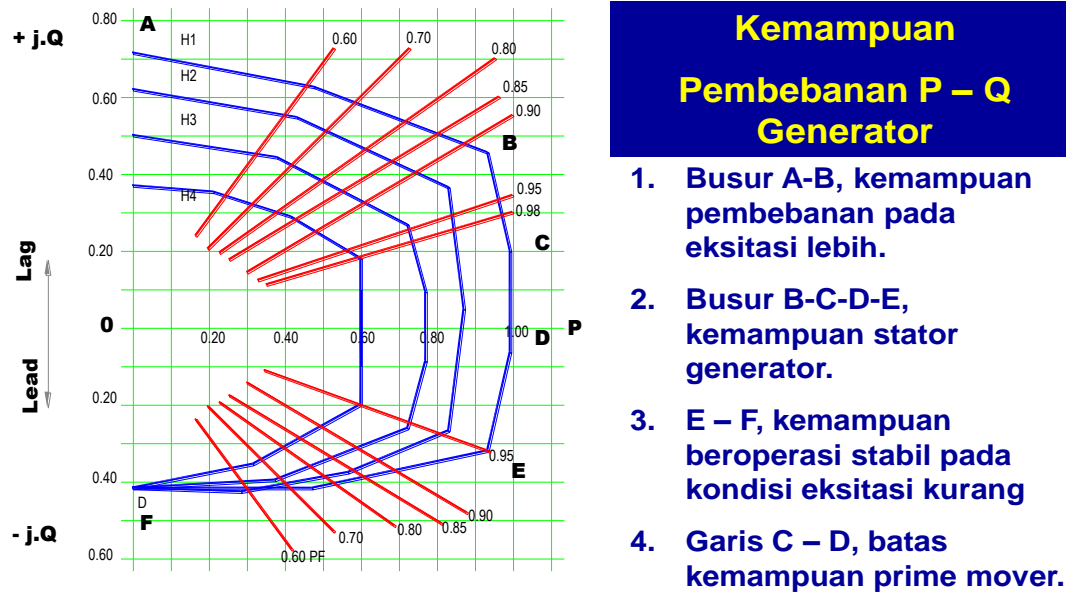
$$Faktordaya = \cos\phi = \frac{P(W)}{S(VA)}$$

**Gambar 2.11** Segitiga Daya

Daya aktif (MW) diatur dengan mengatur kopel penggerak/pemutar generator, sedangkan komponen daya reaktif diatur dengan mengatur arus penguat generator. Daya reaktif adalah daya yang digunakan untuk mempertahankan batas-batas tegangan keluaran pada generator atau sebagai daya peredam karena reaktans beban atau saluran. Peran daya reaktif menstabilkan tegangan, perubahan daya reaktif pada generator dilakukan dengan mengubah arus eksitasi belitan medannya. Oleh karena itu fenomena perubahan daya reaktif atau pengaturan daya reaktif dapat dipandang sebagai fenomena pengaturan fluks medan atau pengaturan arus eksitasi medan. Yang membatasi daya reaktif adalah kemampuan sirkuit eksitasi menyediakan arus penguat yang dipengaruhi oleh sistem pendinginan generator yang menggunakan gas Hydrogen sebagai media pendinginan rotor. Pemanasan local pada daerah akhir belitan jangkar juga merupakan parameter yang membatasi daerah kerja generator. Fluks bocor pada daerah ini akan menimbulkan panas pada inti stator.



**Gambar 2.12** Generator Curve Capability



**Gambar 2.13** Kemampuan Pembebanan Generator

1. Daerah busur A-B bila power factor generator berada pada batas area ini kumparan rotor generator akan timbul pemanasan yang berlebihan karena arus yang tinggi sehingga mendahului tegangan.
2. Daerah busur B-C-D-E bila power factor berada pada area ini kumparan stator generator akan timbul pemanasan yang berlebihan.
3. Daerah busur E-F bila power factor berada pada area ini belitan stator generator akan mengakibatkan pemanasan yang berlebih dikarenakan generator menyerap MVA<sub>r</sub>.

## 2.10 Copper Loss dan Hysterisis Loss

Semua kawat konduktor yang teraliri arus listrik akan selalu menghasilkan panas. Nilai energi panas tersebut berbanding lurus dengan arus yang melalui konduktor, dan juga dengan nilai tahanan konduktor tersebut. Semakin besar arus

listrik ataupun tahanan kawat, maka akan semakin besar pula kerugian panas yang dihasilkan. Tidak terkecuali kawat konduktor yang membentuk lilitan seperti pada kumparan generator rotor maupun stator, selama ada arus listrik yang mengalir kumparan tersebut, maka panas juga pasti akan terbentuk.

Jika *Copper loss* adalah kerugian pada kumparan kawat yang berkaitan dengan arus listrik yang mengalir padanya, maka *Hysteresis loss* adalah kerugian panas yang diakibatkan oleh karakteristik dari logam inti kumparan kawat angker (*armature*). Angker kumparan adalah logam inti yang dililiti oleh kawat kumparan. Sehingga jika ada arus listrik yang mengalir pada kumparan kawat, maka logam angker yang berada di dalam lilitan kawat akan berubah menjadi magnet. Pada saat generator bekerja, partikel-partikel magnet di dalam logam inti akan berusaha terus-menerus mengikuti atau diikuti medan magnet putar. Gerakan partikel logam inti secara terus-menerus tersebut mengakibatkan gesekan *molecular*. Sehingga hal ini mengakibatkan panas, secara spesifik menjadi kerugian panas. Fenomena inilah disebut sebagai *hysteresis loss* pada generator. Untuk meminimalisir panas yang terbentuk pada logam angker adalah membagi logam inti menjadi beberapa lembaran. Lembaran-lembaran logam inti tersebut didesain sehingga jika disatukan akan menjadi satu logam inti utuh. Metode ini secara signifikan meminimalisir gesekan *molecular* yang terjadi pada logam inti karena bentuk lembaran ini seakan-akan menghalangi partikel inti logam untuk tidak dengan mudah berpindah tempat dari lembaran satu ke yang lainnya. (Sumber: *Wikipedia: AC Power, Electric load dan Electric Power; "Proteksi Generator" P2B training untuk IHT Pembangkitan Tanjung Jati B, Februari 2014*).