

**PELATIHAN
PEMBINAAN DAN SERTIFIKASI AHLI K3 LISTRIK**

**K3 PERSYARATAN PERENCANAAN INSTALASI
PERLENGKAPAN DAN PERALATAN LISTRIK
PEMBANGKIT**

HARTOYO

085640929467

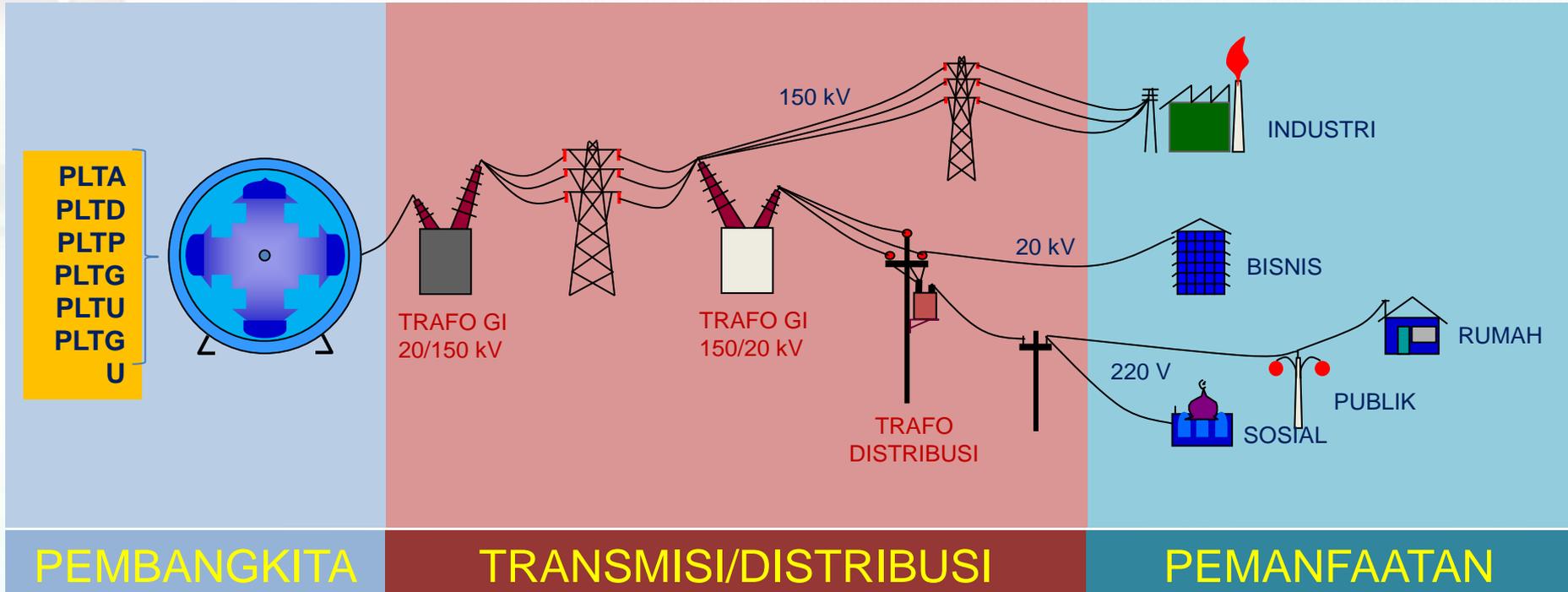
hartoyo@uny.ac.id

UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA

CENTRA GAMA INDOVISI CONSULTANT
Yogyakarta, 09 November 2019



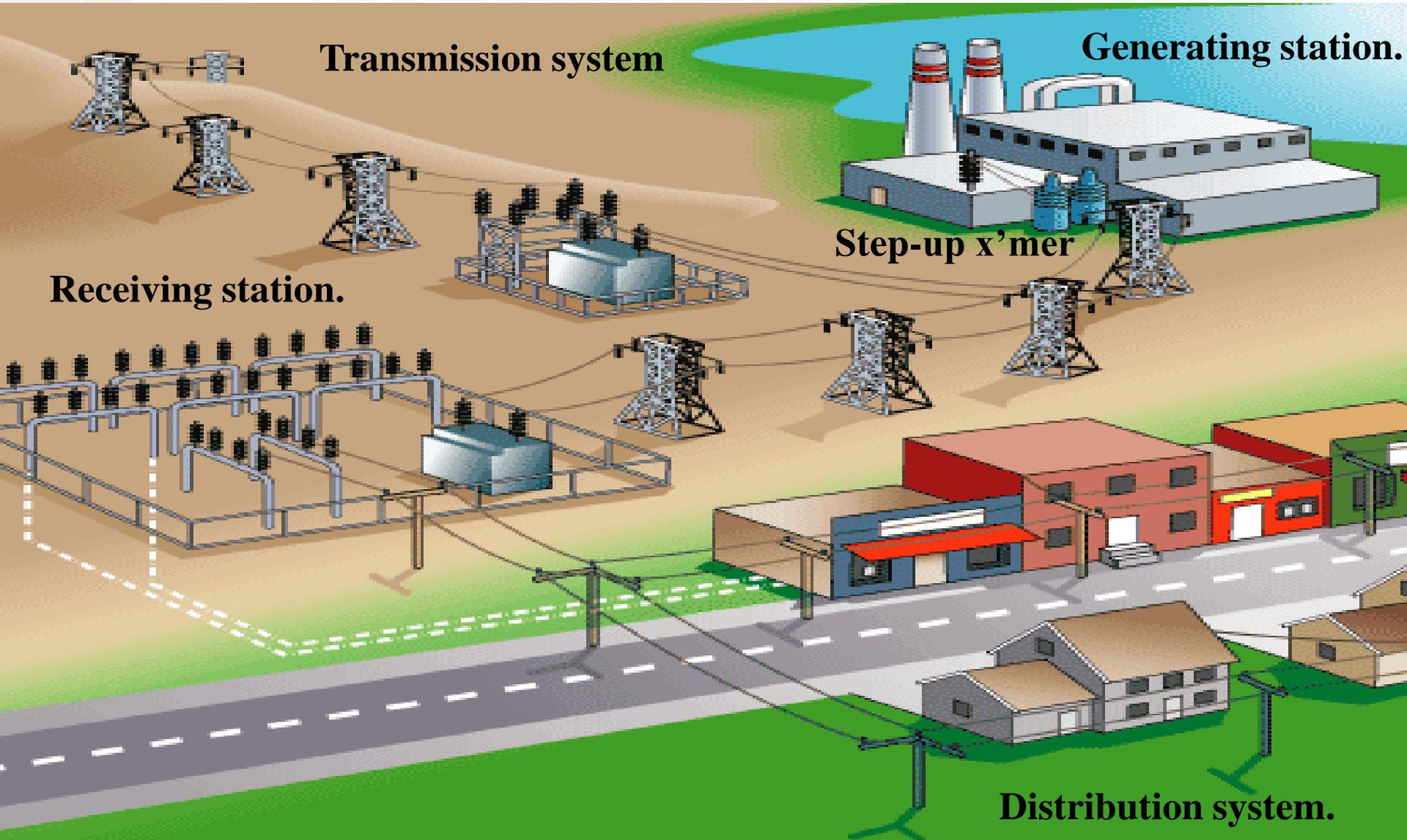
INSTALASI TENAGA LISTRIK



Instalasi tenaga listrik tenaga listrik terdiri atas:

1. Instalasi penyediaan tenaga listrik, meliputi
 - a. Instalasi pembangkit tenaga listrik;
 - b. Instalasi transmisi tenaga listrik; dan
 - c. Instalasi distribusi tenaga listrik.
2. Instalasi pemanfaatan tenaga listrik, meliputi:
 - a. Instalasi pemanfaatan tegangan tinggi;
 - b. Instalasi pemanfaatan tegangan menengah; dan
 - c. Instalasi pemanfaatan tegangan rendah.

Transmission and Distribution supply system.





Trafo Distribusi



MV Industri



Pembangkit

Transmisi

Distribusi primer

Distribusi

Pemanfaatan

13,8 kV-24 kV

115 kV-700 kV

70 kV-150 kV

20 kV

380 / 220 V

High Voltage

Extra High Voltage / SUTET

High Voltage

Medium Voltage

Low Voltage

Voltage Levels

	USA	PUIL 2011, page 43	PLN
Extra Low Voltage (ELV)	Standard	Safe for human : < 50 Volt (ac) < 120 Volt (dc)	
Low Voltage (LV)	110 Volt , 240 Volt, 480 Volt	< 1000 Volt (ac) < 1500 Volt (dc)	380 Volt/220 Volt SUTR,SKTR
Medium Voltage (MV)	4.16 kV, 13.8 kV ,34.5 kV	1 kV - 35 kV	6KV,20KV SUTM,SKTM
High Voltage (HV)	69 kV, 115 kV ,138 kV, 161 kV ,230 kV, 287 KV	> 35 kV	150 KV SUTT, SKTT
Extra High Voltage (EHV)	345 kV, 500 kV 765 kV		500 KV SUTET
Ultra High Voltage (UHV)	1100 kV, 1500 kV		

Sistem Tenaga Listrik

- Energi listrik mempunyai karakteristik ekonomis, mudah, dan aman untuk dibangkitkan, ditransmisikan, didistribusikan dan digunakan oleh konsumen dibanding energi lainnya.
- Listrik dihasilkan oleh pembangkit (minyak, gas, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik.
- Generator Sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik.
- Trafo berfungsi menaikkan tegangan (Step-up) dari tegangan pembangkit (TM) ke tegangan transmisi (TT)
- Energi listrik dikirim melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban.
- Tegangan tinggi dimaksudkan untuk mengurangi arus yang mengalir pada saluran transmisi.

Sistem Tenaga Listrik

- Dengan Daya yang sama, penggunaan saluran transmisi tegangan tinggi berdampak pada arus yang lebih rendah
- Arus yang rendah berpengaruh pada rugi panas (heat loss) I^2R pada penghantar dapat dikurangi.
- Permasalahan yang muncul berkaitan dengan tegangan tinggi yaitu masalah isolasi (teknik) dan sosial (medan magnet dan medan listrik)
- Pada pusat beban, tegangan transmisi diturunkan menjadi tegangan menengah, melalui transformer penurun tegangan (step-down transformer).
- Untuk pemakaian tegangan menengah diturunkan menjadi tegangan rendah 380/220 Volt atau tegangan yang sesuai untuk motor-motor listrik di Industri

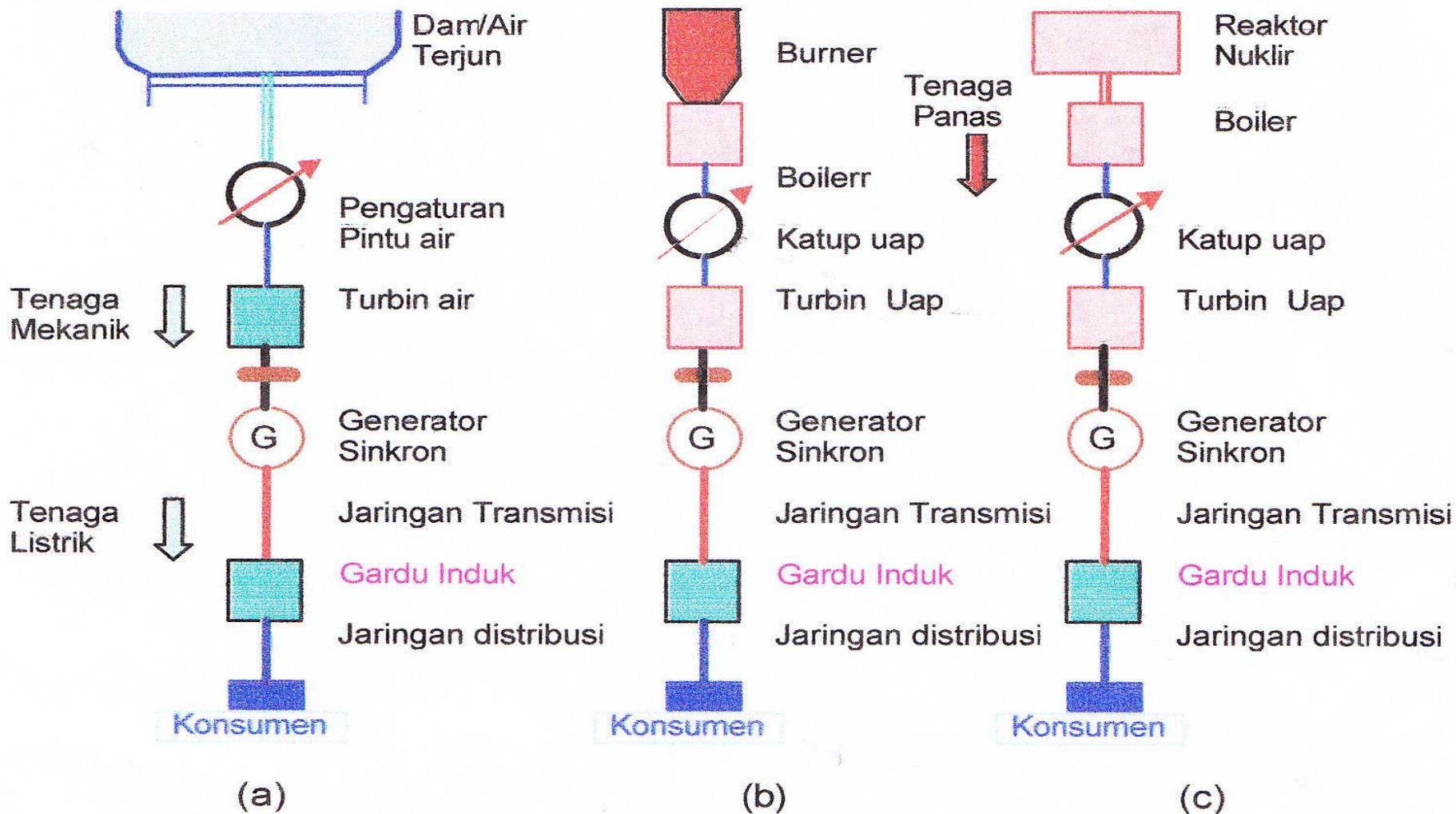


Pembangkit Listrik

- Proses pembangkitan energi listrik adalah proses konversi tenaga primer (bahan bakar atau potensi tenaga air) menjadi tenaga mekanik sebagai penggerak generator listrik dan selanjutnya generator menghasilkan energi listrik.
- Jenis pembangkit energi listrik (a). Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) , (b). Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), (c). Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), PLTU, PLTG, PLTD dan PLT lainnya.



Pembangkit Listrik



Jenis dan Teknologi Pembangkit Listrik

Tenaga listrik dihasilkan di pusat-pusat pembangkit tenaga listrik. Berdasarkan sumber dan asal tenaga listrik dihasilkan, dapat dikenal pusat-pusat listrik:

Pusat pembangkit listrik

Pusat pembangkit listrik tenaga thermo merupakan pusat pembangkit konvensional menggunakan bahan bakar yang berbentuk padat, cair, dan gas.

- Pusat pembangkit listrik tenaga thermo, terdiri dari:
(1).PLTU, (2).PLTG, (3).PLTD, (4).PLTGU, (5).PLTP.
- Pusat pembangkit listrik tenaga hidro, terdiri dari:
(5).PLTA, (6).PLTmikrohidro.
- Pusat pembangkit listrik tenaga nuklir :
(7).PLTN.

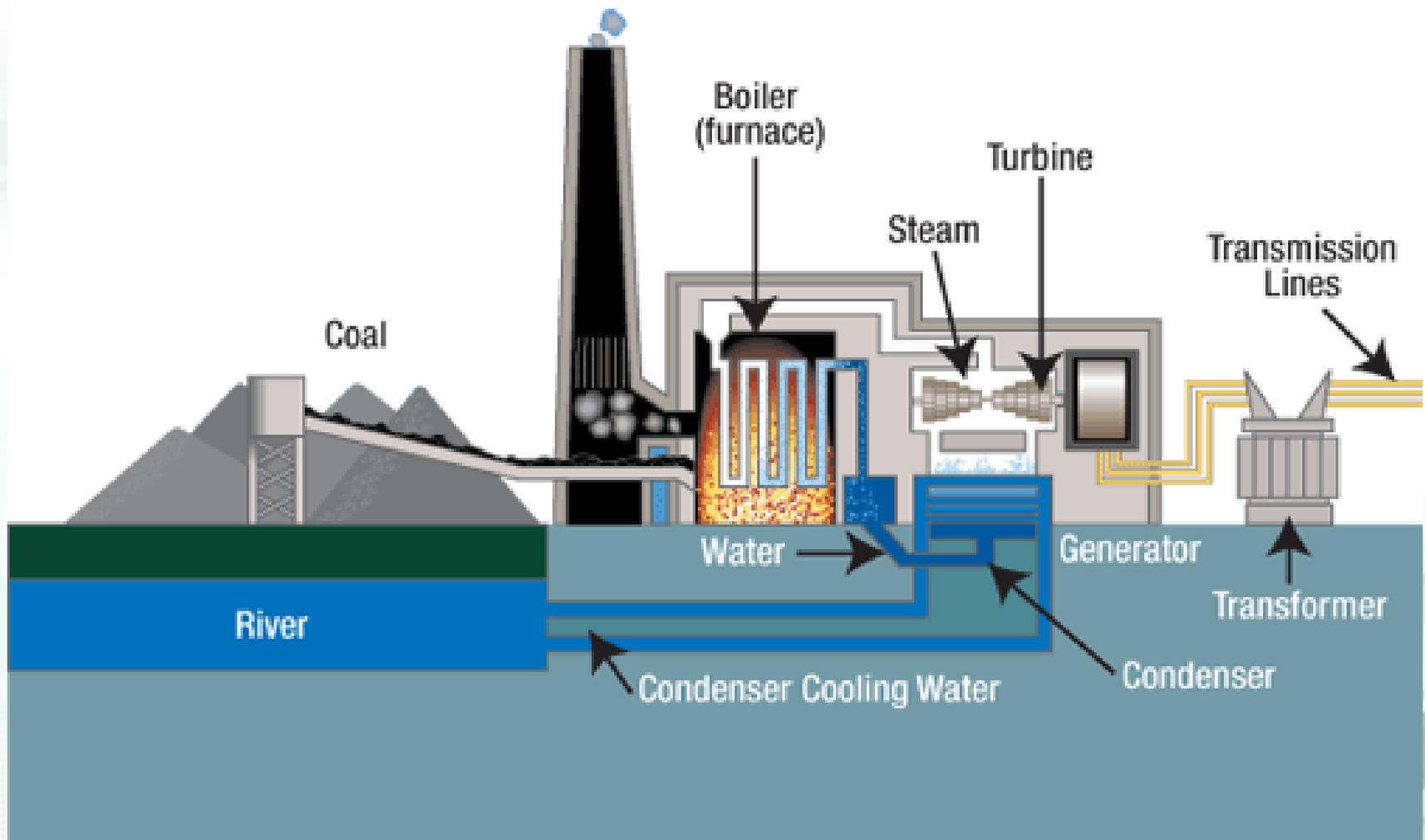


Jenis dan Teknologi Pembangkit Listrik

- Selain pembangkit listrik konvensional, saat ini tengah dikembangkan beberapa teknologi konversi untuk sumber daya energi baru seperti : biomassa, solar, limbah kayu, angin, gelombang laut, dan sebagainya.
- Pembangkit listrik melalui cara magnetohidrodinamik (MHD) pada saat ini juga sedang memasuki tahap penelitian dan pengembangan yang intensif.



Pembangkit Listrik

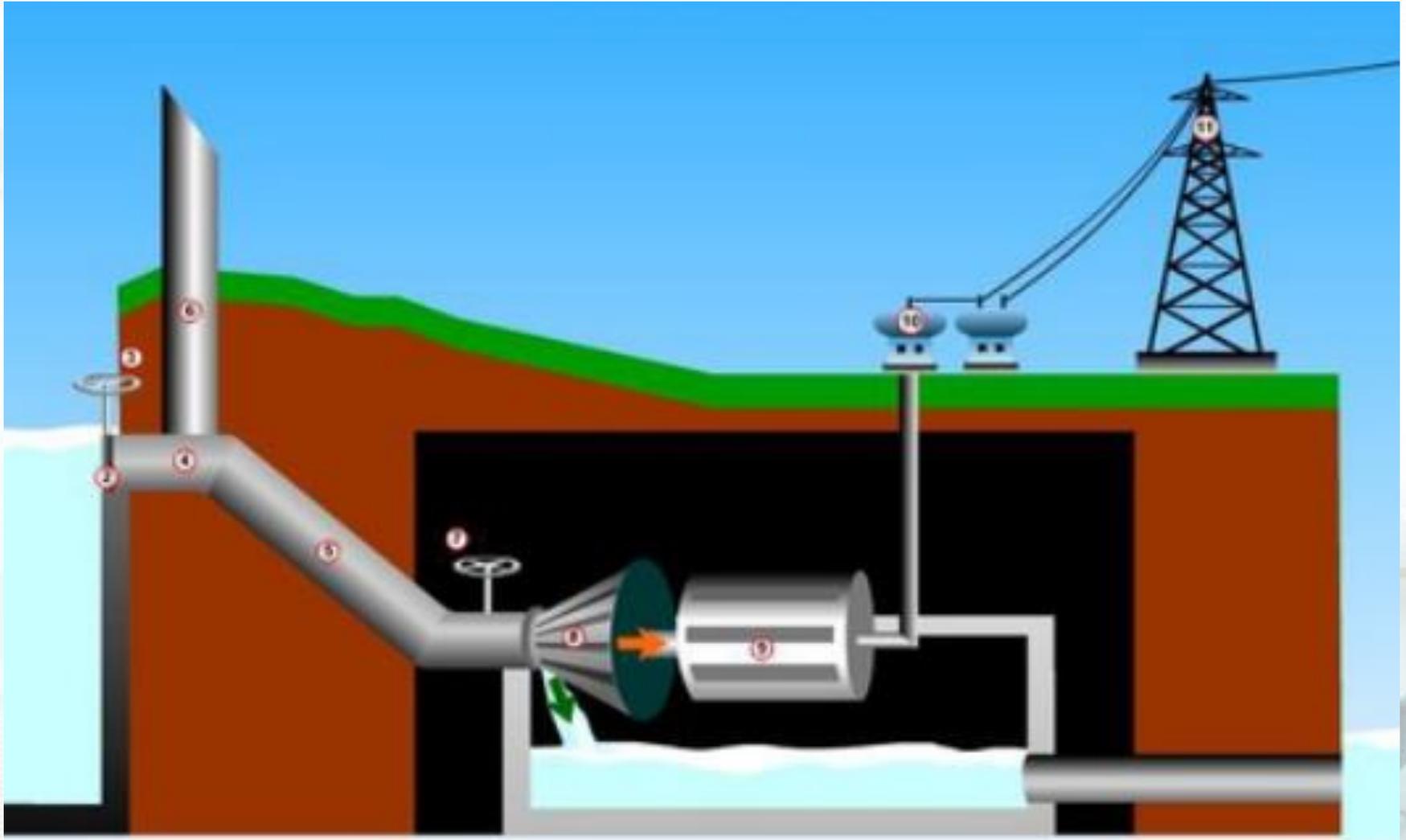


PEMBANGKIT LISTRIK

Pembangkit listrik adalah bagian dari alat industri yang dipakai untuk memproduksi dan membangkitkan tenaga listrik dari berbagai sumber tenaga



Pembangkit Listrik Tenaga Air



PLTA KOLAM TANDO

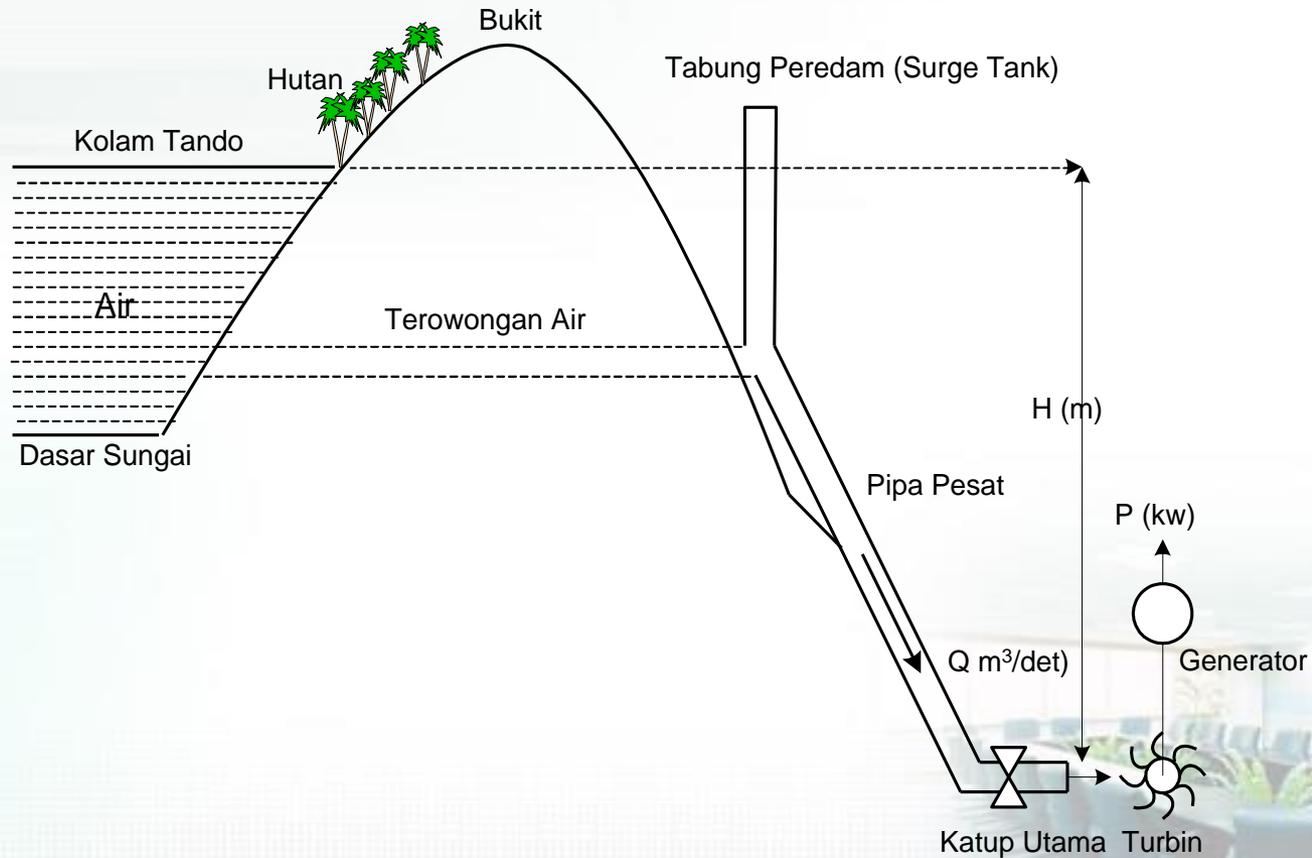


Bendungan PLTA Mrica di Jawa Tengah dengan kapasitas 3 x 60,3 MW dimana tampak Bendungan beserta Pelimpasannya (sisi kiri) dan Gedung PLTA beserta Air Keluarnya (sisi kanan).



Bendungan Waduk PLTA Saguling 4 x 175 MW dimana tampak Rock Fill Dam (sisi kiri) dan Pelimpasan (bagian tengah) serta Pintu Air untuk pengamanan Dam.

PUSAT LISTRIK TENAGA AIR DENGAN KOLAM TANDO

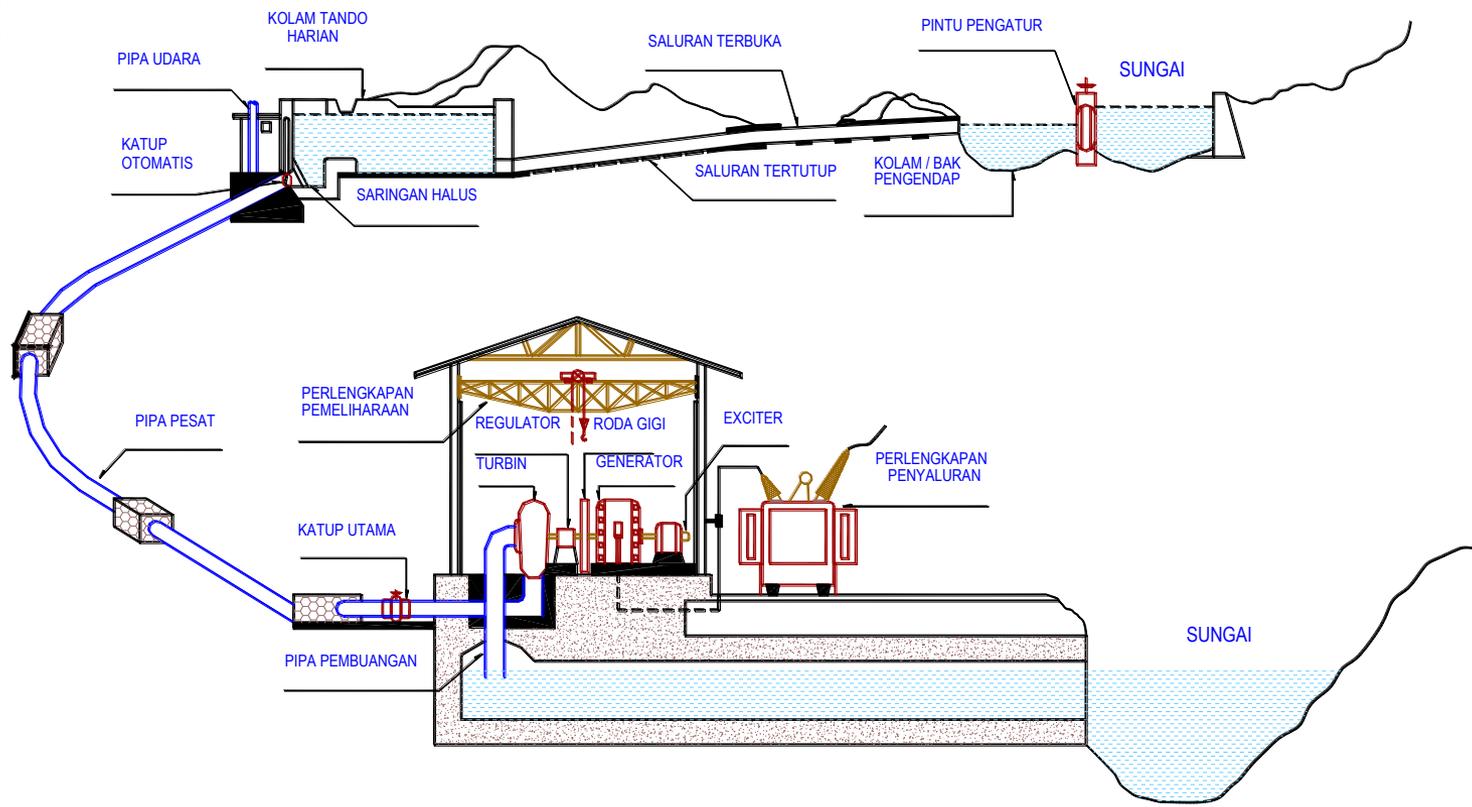


Proses konversi energi dalam Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA).

PUSAT LISTRIK TENAGA AIR RUN OFF RIVER

PUSAT LISTRIK TENAGA AIR

PRINSIP KERJA



Prinsip kerja PLTA Run off River.

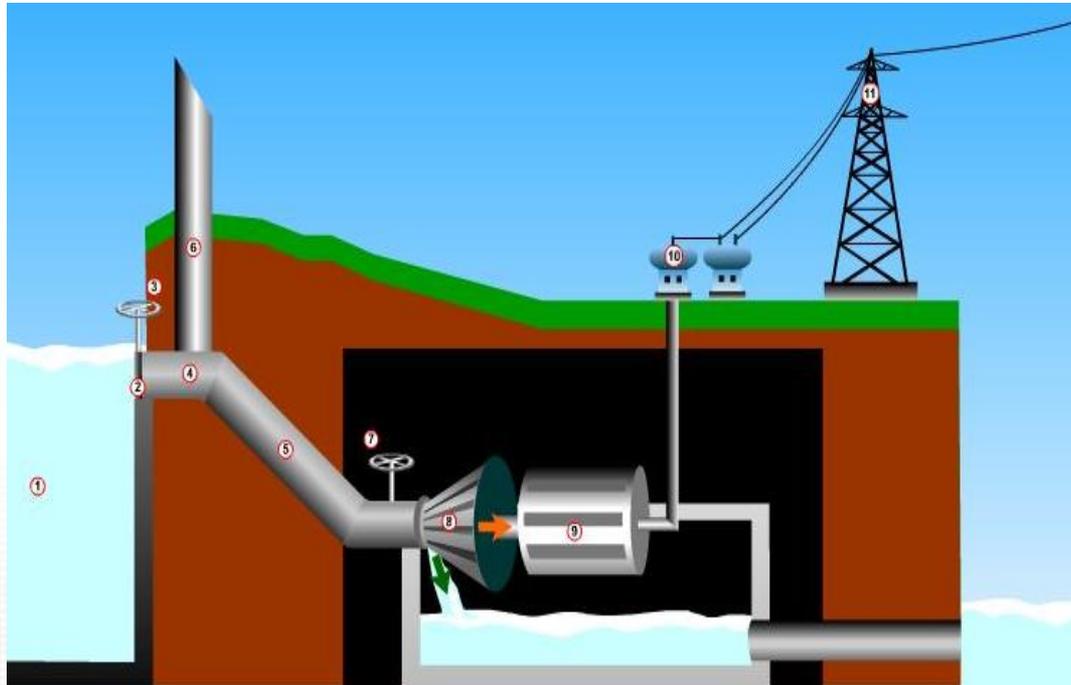


Bagian-bagian utama PLTA

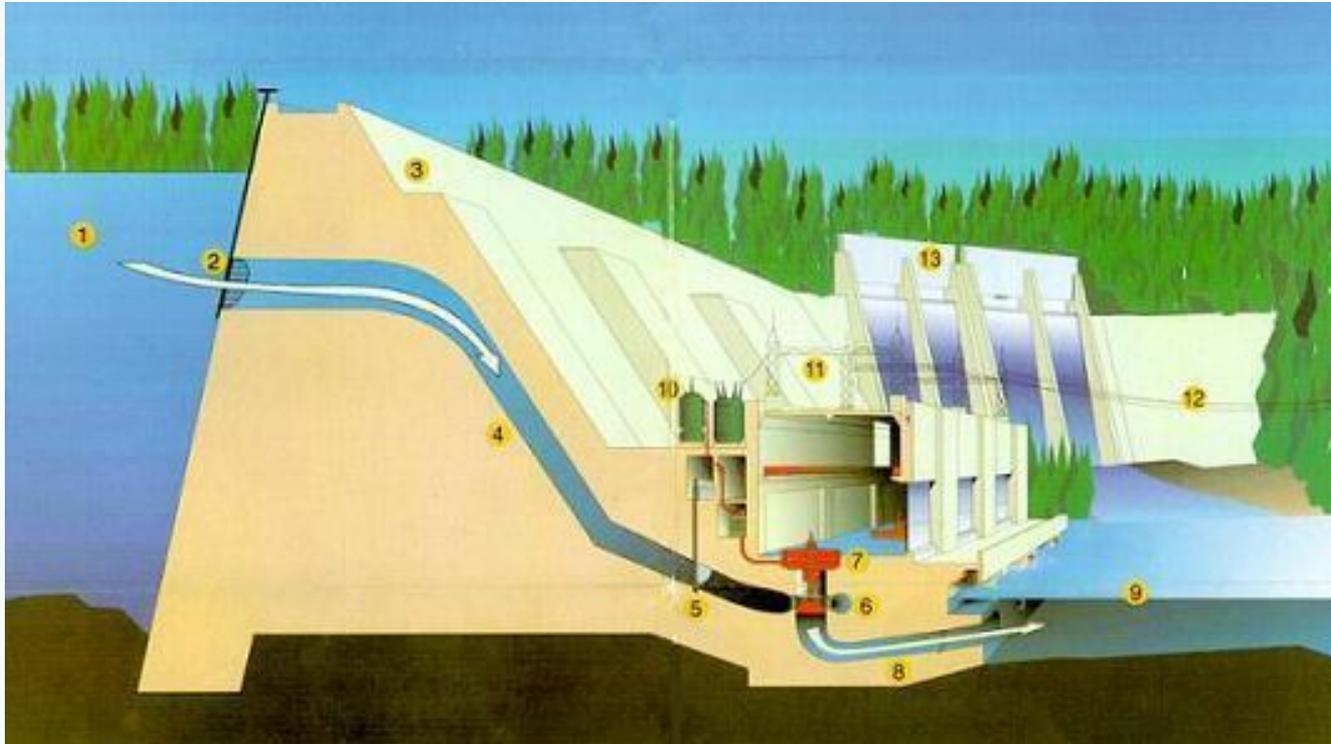
- Bendungan/dam (water reservoir)
- Pipa pesat (pipe line)
- Turbin air (water turbine)



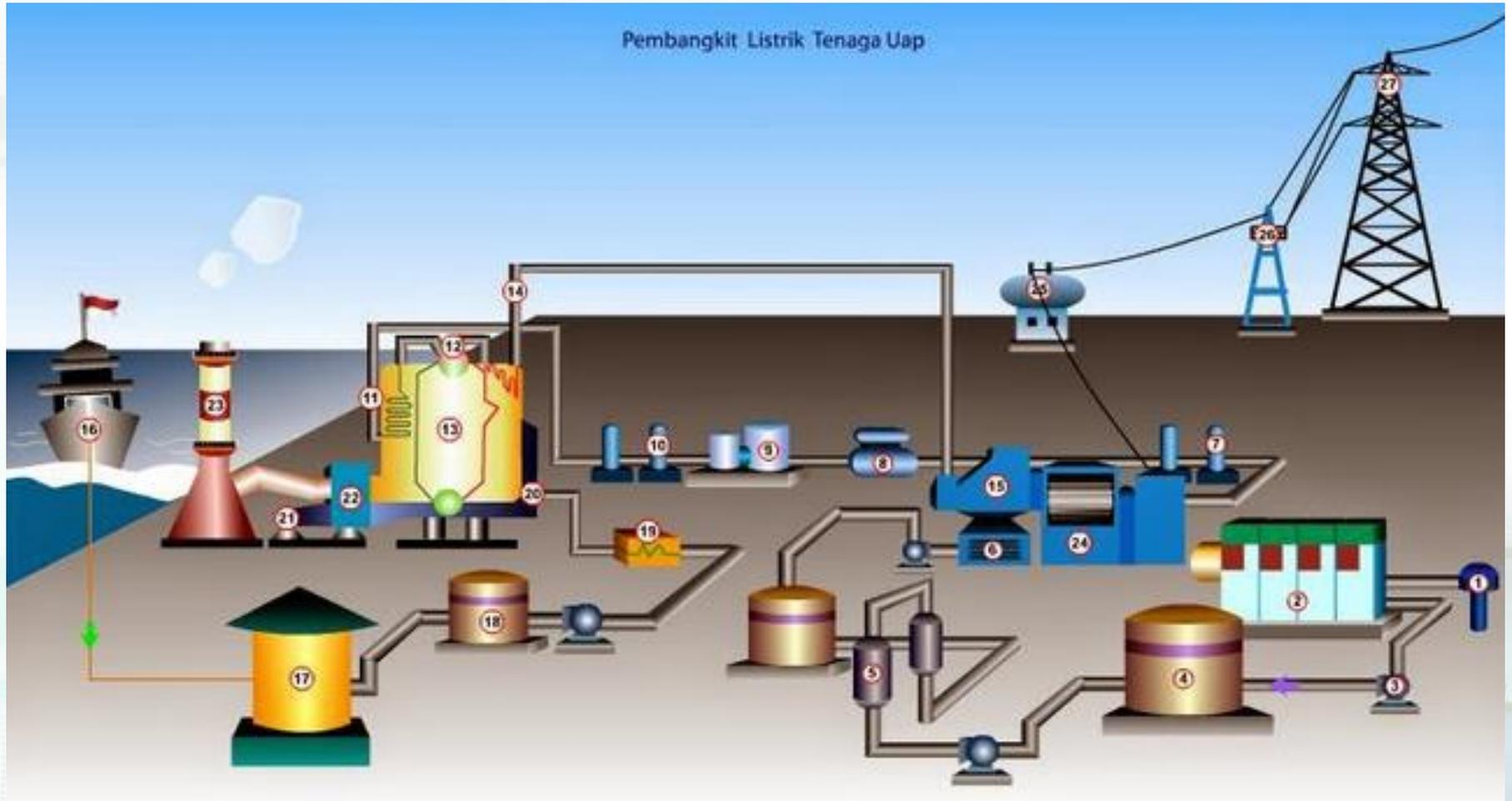
Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari air. Namun, secara luas pembangkit listrik tenaga air tidak hanya terbatas pada air dari sebuah waduk atau air terjun, melainkan juga meliputi pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air dalam bentuk lain seperti tenaga ombak.



Gambar Prinsip Kerja PLTA



Pembangkit Listrik Tenaga Uap



PLTU (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara adalah salah satu jenis instalasi pembangkit tenaga listrik dimana tenaga listrik didapat dari mesin turbin yang diputar oleh uap yang dihasilkan melalui pembakaran batubara



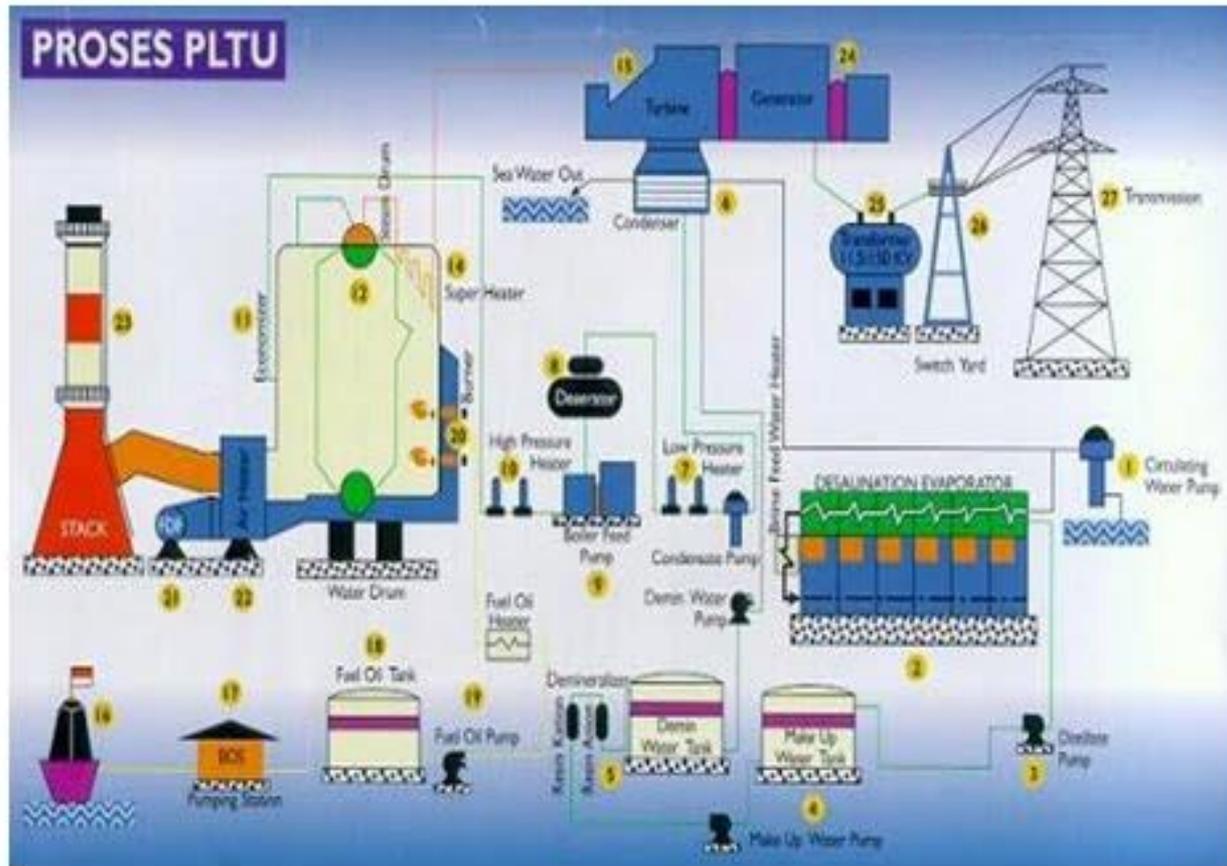


Bagian Utama PLTU

- Turbin uap (steam turbine)
- Boiler (steam generator)
- Kondensor (condenser)
- Pompa-pompa (pumps)



Gambar Prinsip Kerja PLTU



PLTU : PROSES KONVERSI ENERGI PANJANG

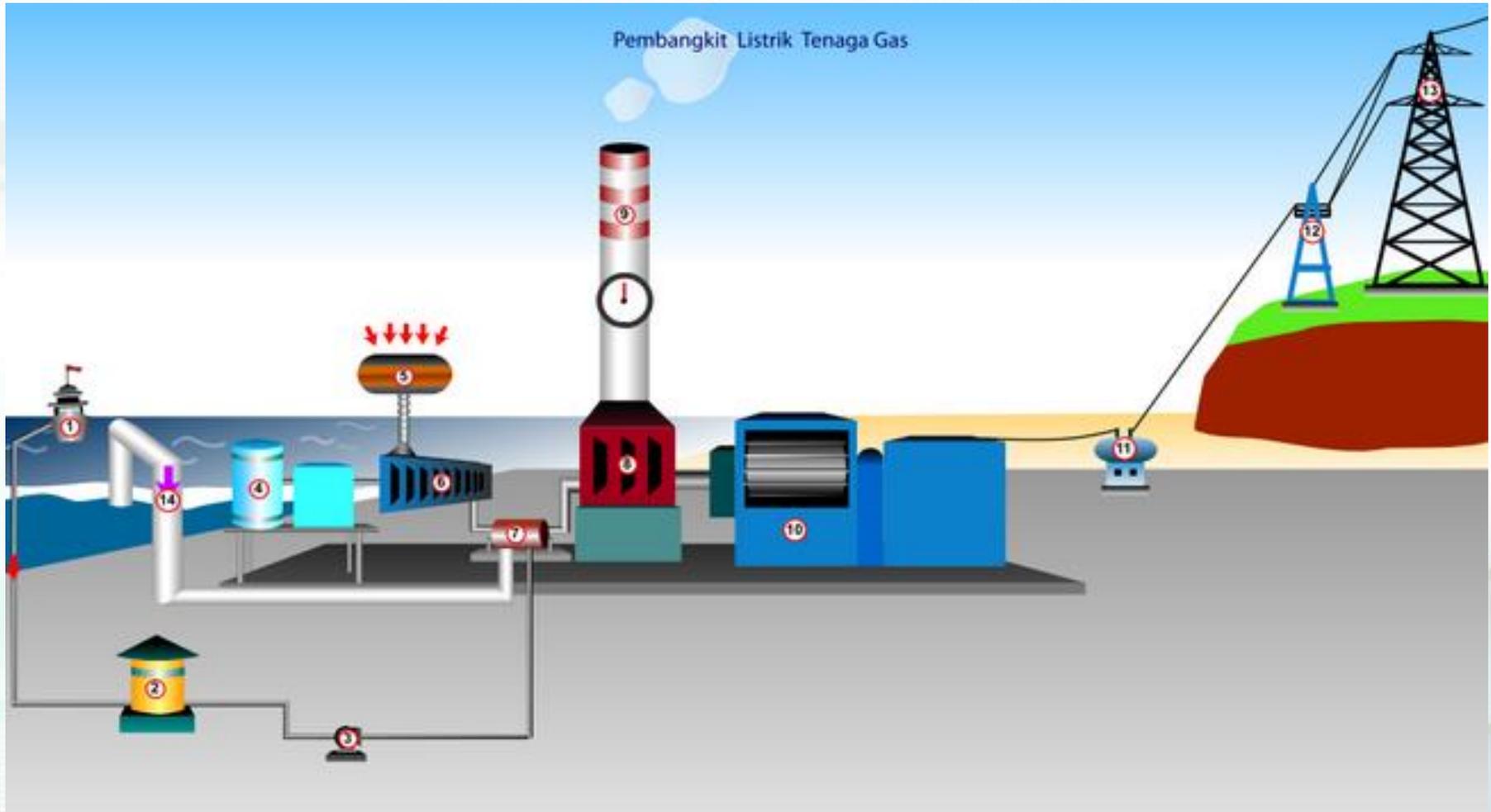


Coal Yard PLTU Suralaya 4 x 400 MW dan 3 x 600 MW di Jawa Barat dimana tampak Conveyor Pengangkut Batu Bara dan Cerobong.

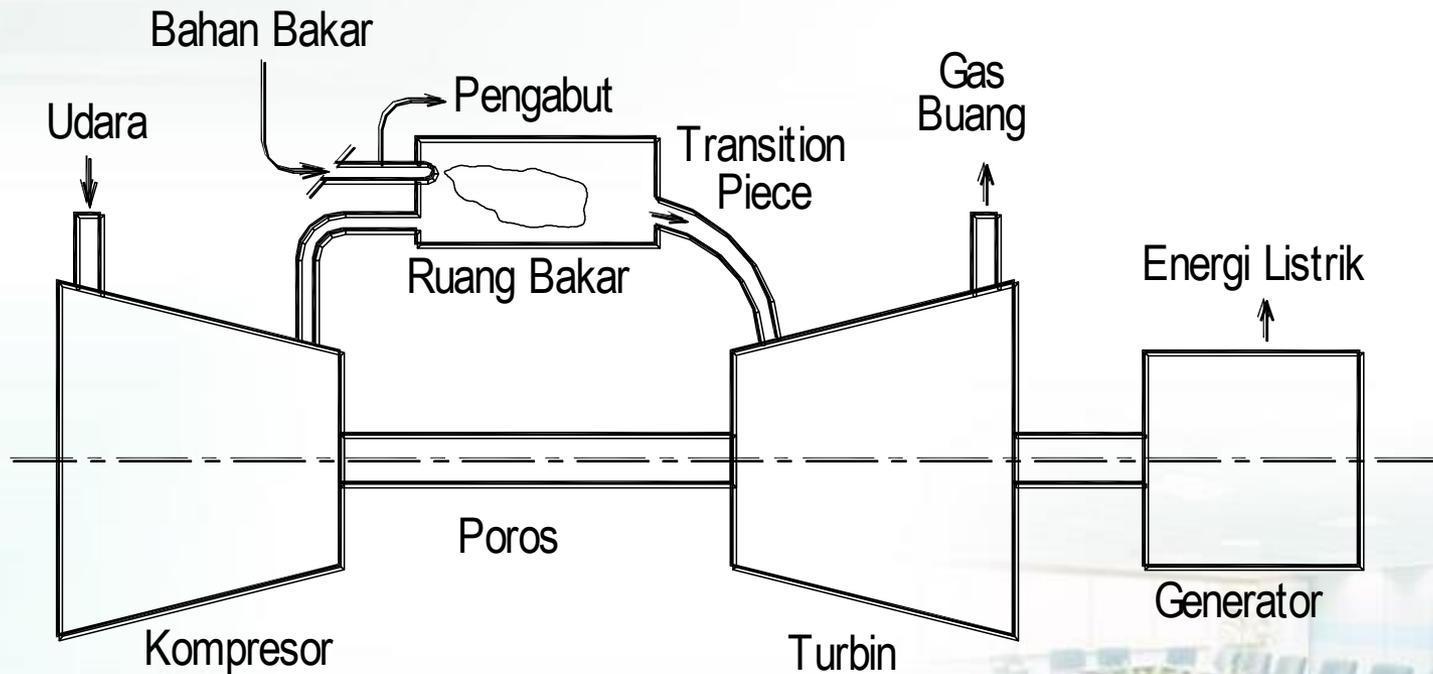


PLTU Paiton milik PLN 2 x 400 MW di Jawa Timur dimana tampak Intake Air, Conveyor Batu Bara, Ketel Uap, dan Cerobong.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas



PUSAT LISTRIK TENAGA GAS



*Transition piece:
Tempat transisi / terjadinya perubahan.*

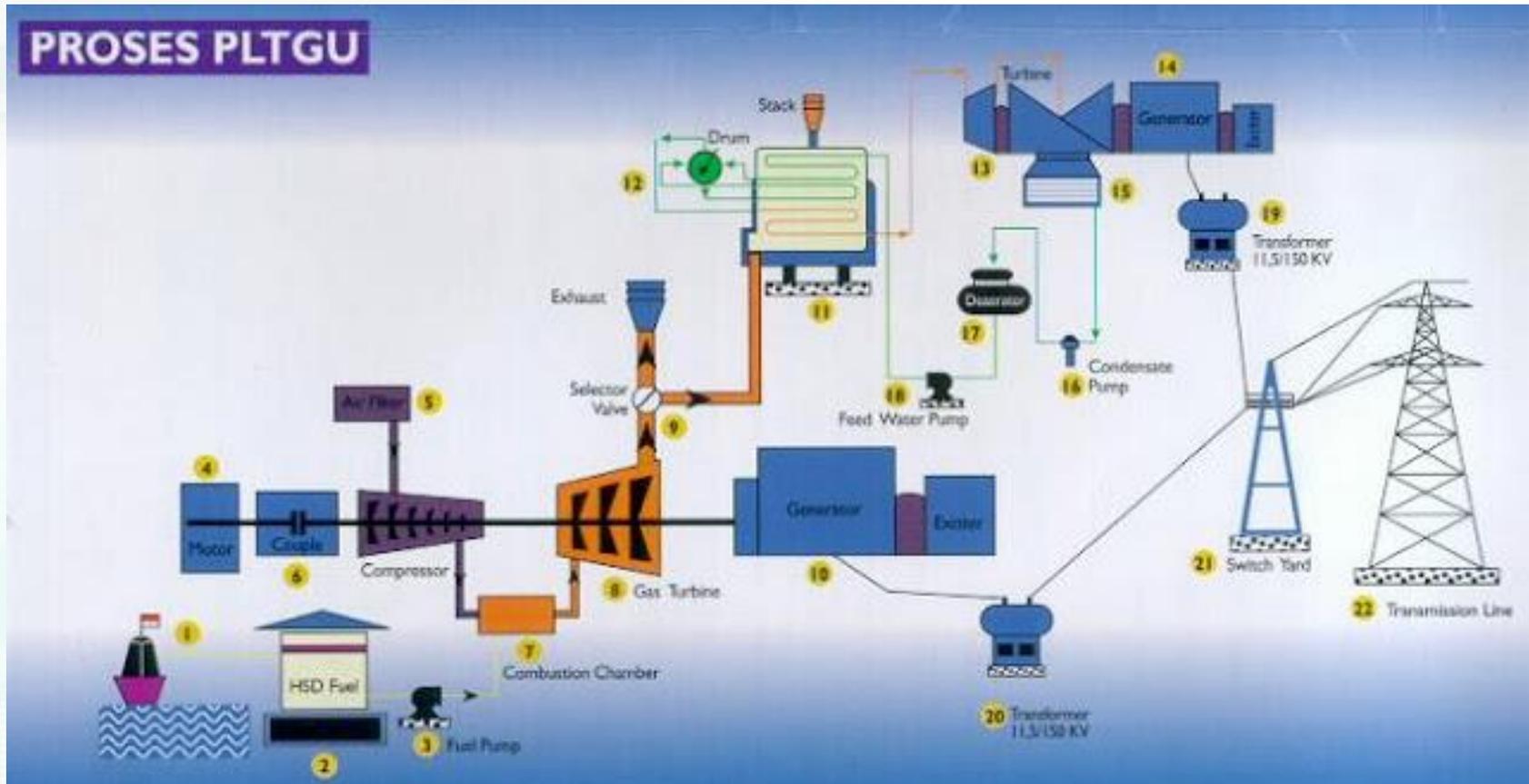
Prinsip kerja Unit Pembangkit Turbin Gas

PLTG (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS)

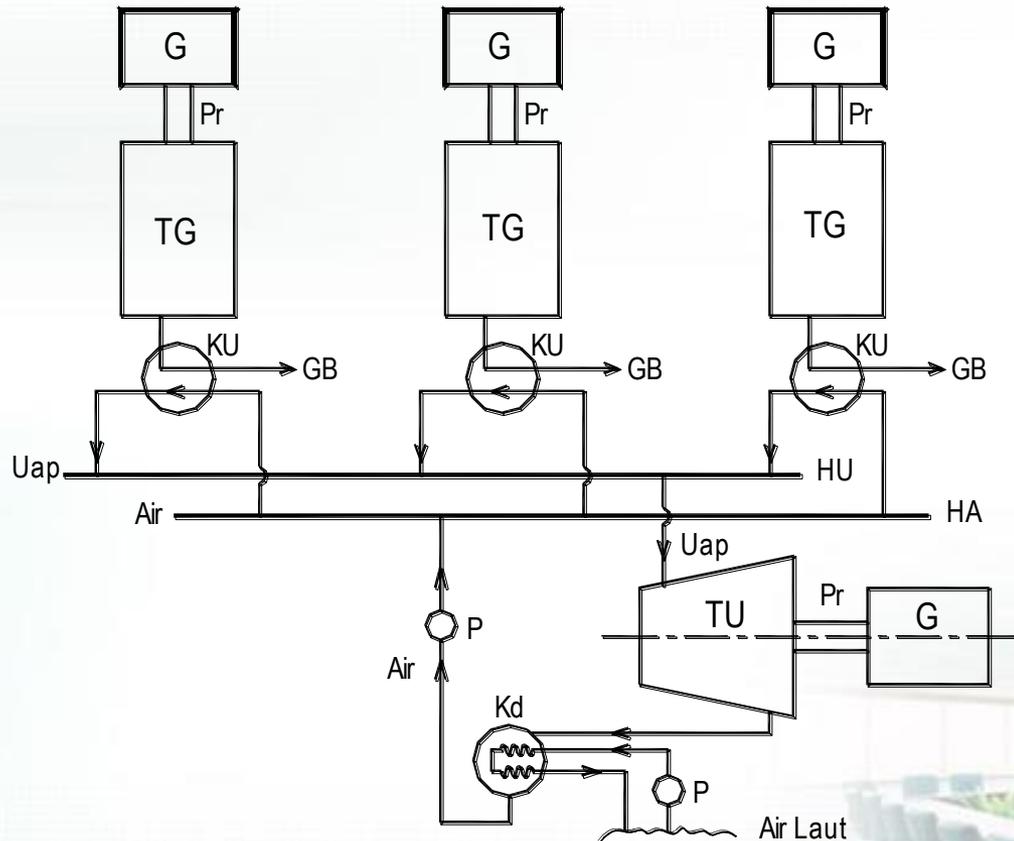
Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan sebuah pembangkit energi listrik yang menggunakan peralatan/mesin turbin gas sebagai penggerak generatornya



Gambar Prinsip Kerja PLTG



PUSAT LISTRIK TENAGA GAS DAN UAP



Skema sebuah Blok PLTGU yang terdiri dari 3 Unit PLTG dan sebuah Unit PLTU

HU : Header Uap, Kd : Kondensor, Pr : Poros, HA : Header Air, G : Turbin Gas, TU : Turbin Uap,
KU : Ketel Uap, G : Generator, GB : Gas Buang, P : Pompa

PLTGU : EFISIENSI TERMAL PALING TINGGI

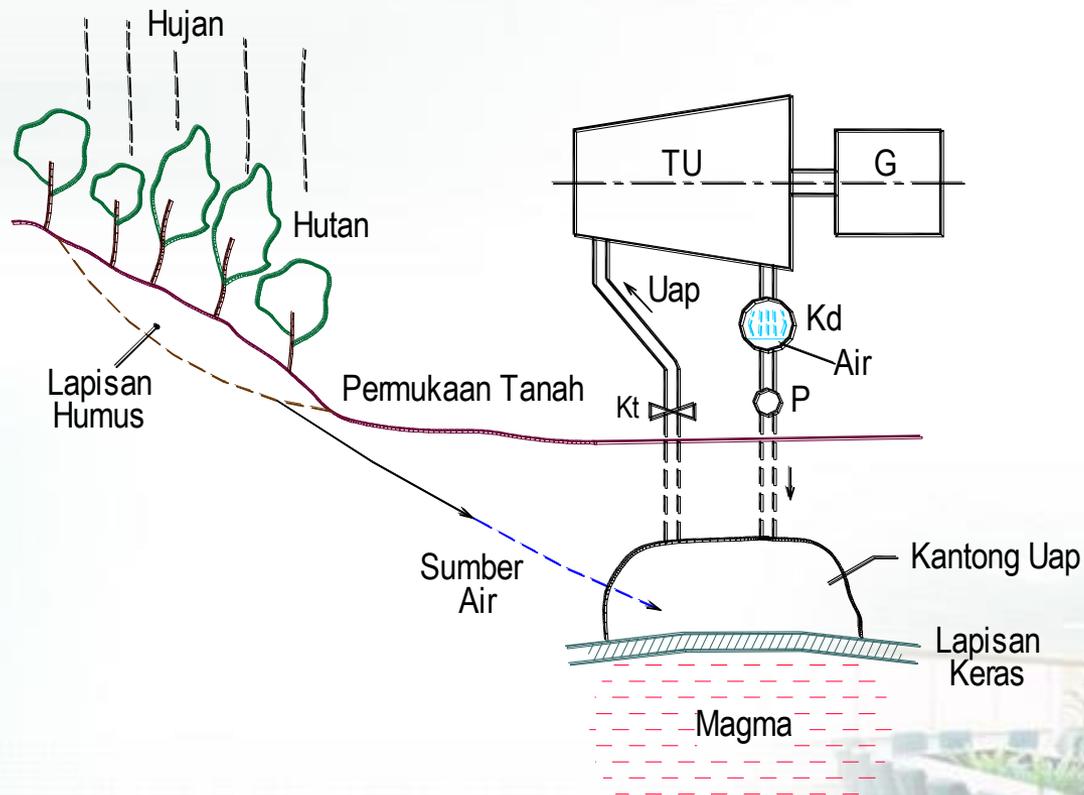


*Heat-Recovery Steam Generator
PLTGU Tambak Lorok Semarang
dari Unit PLTG 115 MW.*



PLTGU Grati di Jawa Timur (Pasuruan)

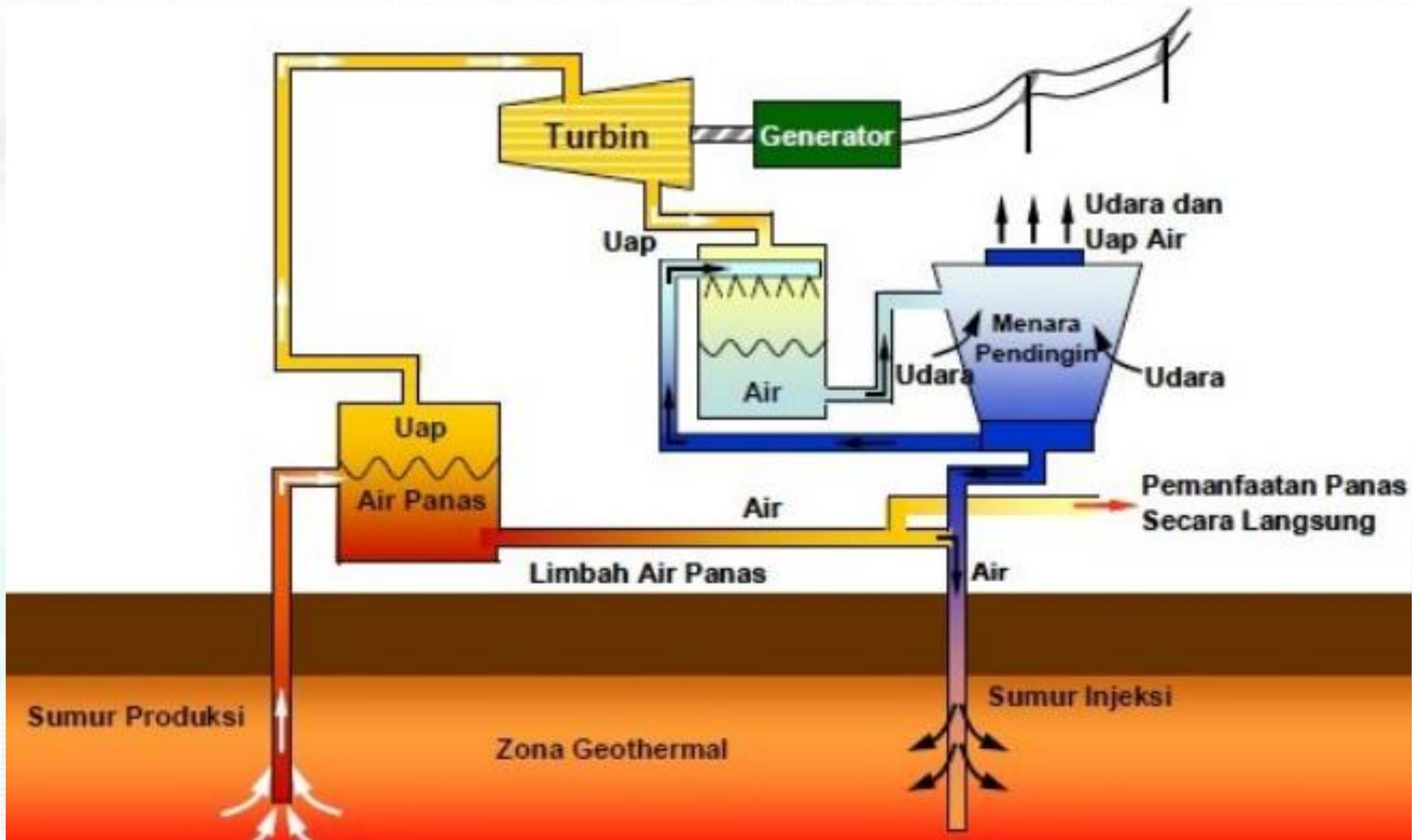
PUSAT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI



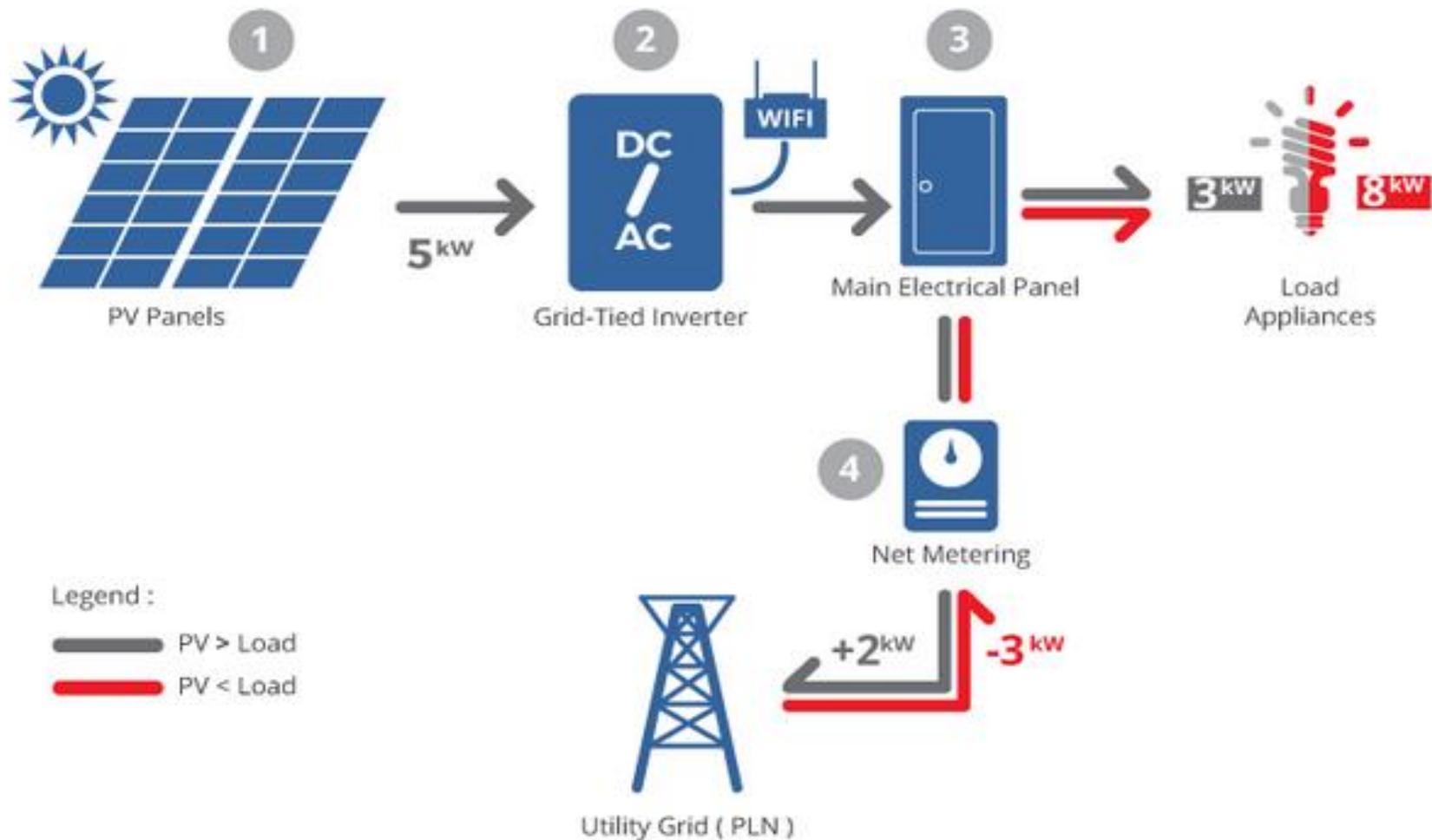
Skema Sirkuit Uap dan Air pada PLTP.

TU : Turbin Uap, Kd : Kondensator Kontak Langsung, Kt : Katup, G : Generator, P : Pompa

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi



Pembangkit Listrik Tenaga Surya



Pembangkit Listrik Tenaga Angin

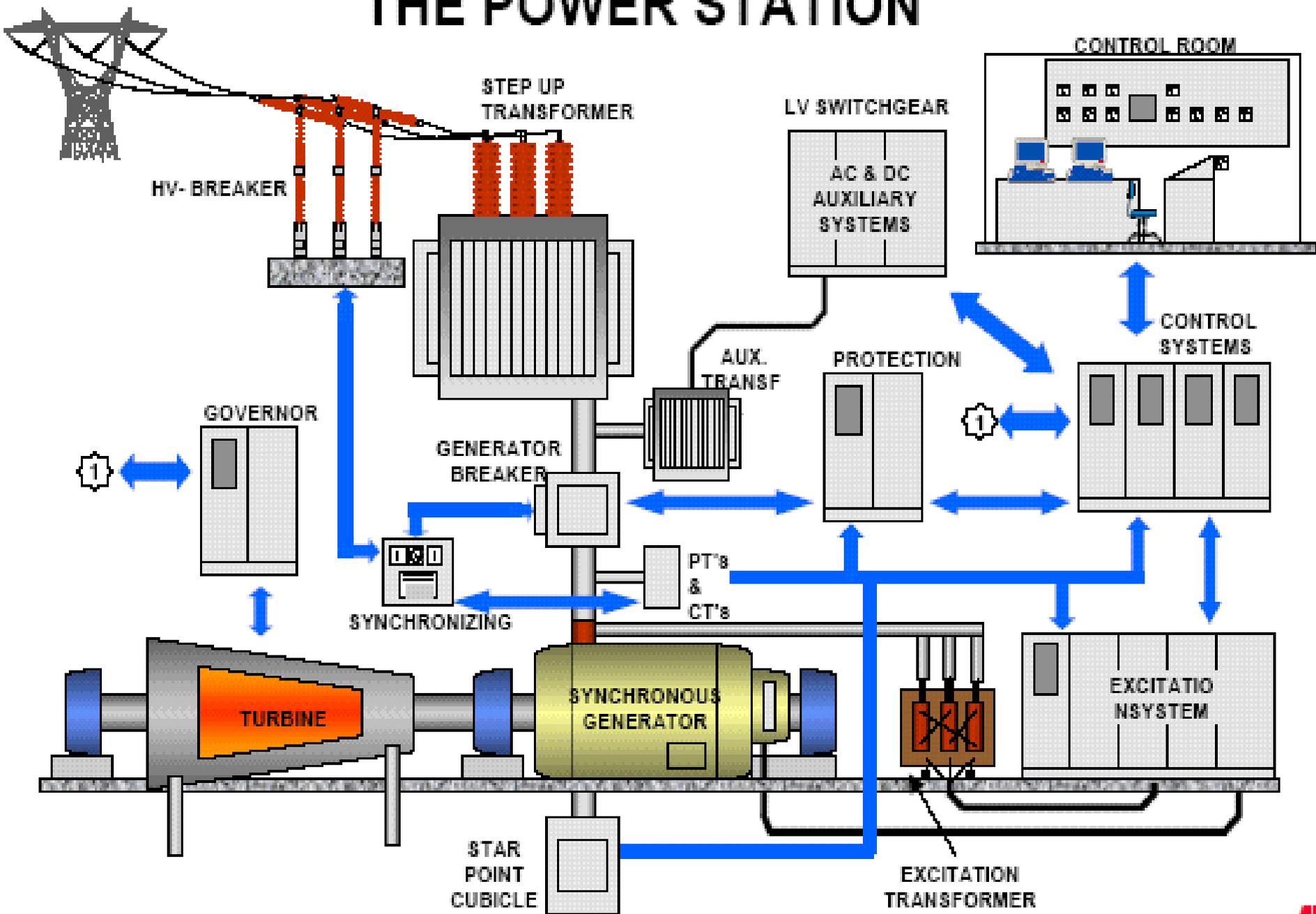


Power Generator



HV SYSTEM

THE POWER STATION



Perencanaan Pembangkitan dalam Sistem Interkoneksi

Neraca energi

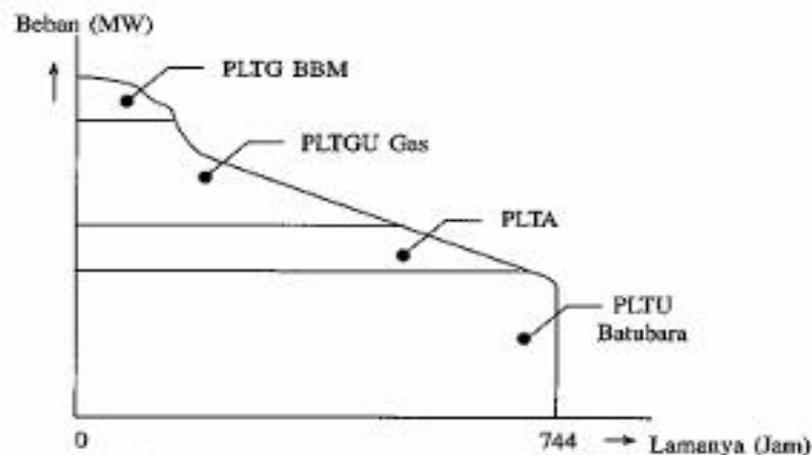
untuk menyusun anggaran operasional sistem tenaga listrik



-  Unit beroperasi
-  Unit siap operasi tetapi tidak dioperasikan
-  Unit menjalani pemeliharaan
-  Unit mengalami gangguan

Perencanaan Pembangkitan dalam Sistem Interkoneksi

Kurva Lama Beban



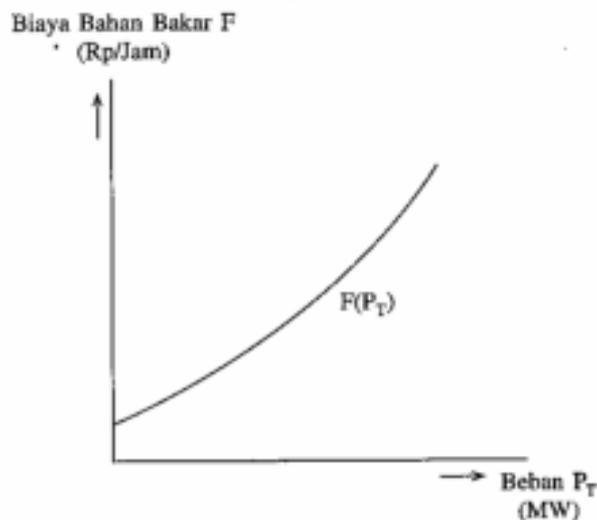
Keterangan:

Konsumsi Spesifik Bahan Bakar:
cc/kWh untuk Bahan Bakar Cair.
kg/kWh untuk Bahan Bakar Padat.
MMSCF/kWh untuk Bahan Bakar Gas.

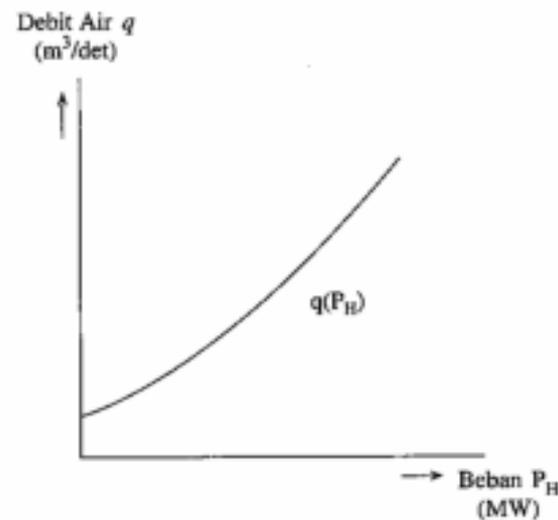
Gambar 4.5. Alokasi energi untuk satu bulan (744 jam) melalui segmentasi kurva lama beban.

Perencanaan Pembangkitan dalam Sistem Interkoneksi

Kurva Input-Output



Gambar 4.7A. Kurva input-output dari unit pembangkit termis.



Gambar 4.7B. Kurva input-output dari unit pembangkit hidro.

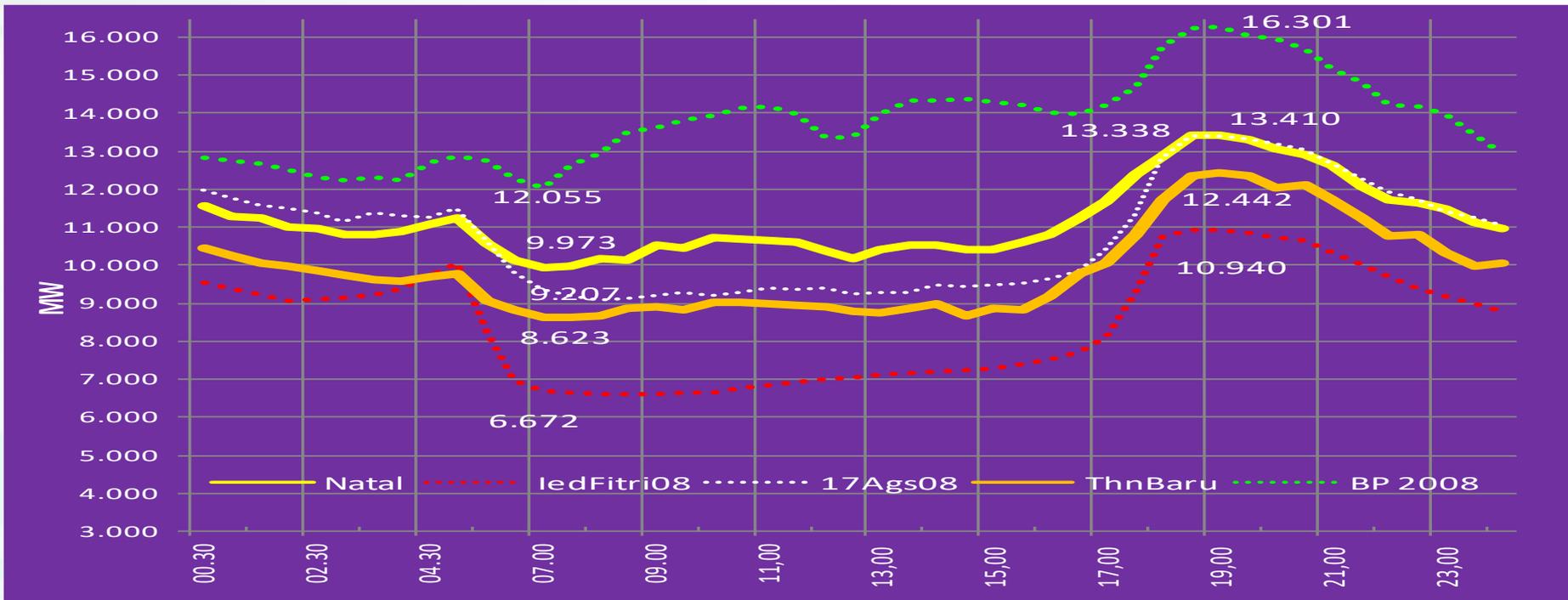


Perencanaan Operasi Sistem

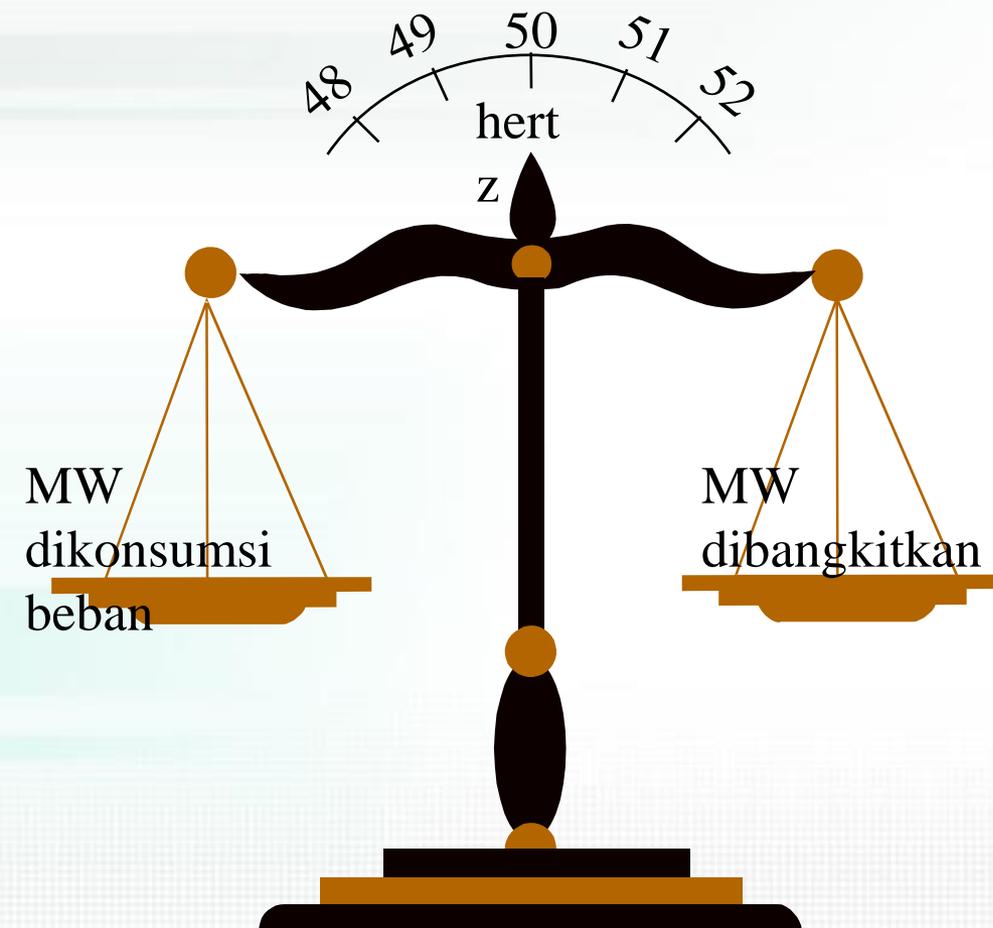
1. Pembuatan Prakiraan Beban (Rencana Energi)
2. Perencanaan Hidro
3. Penjadwalan Pembangkit
4. Penjadwalan Penyaluran
5. Penyusunan Neraca Daya
6. Optimasi Hidrothermal
7. Simulasi Produksi
 - Optimasi dan Biaya Operasi
 - Studi Kecukupan Daya



Prakira Beban dan Energi

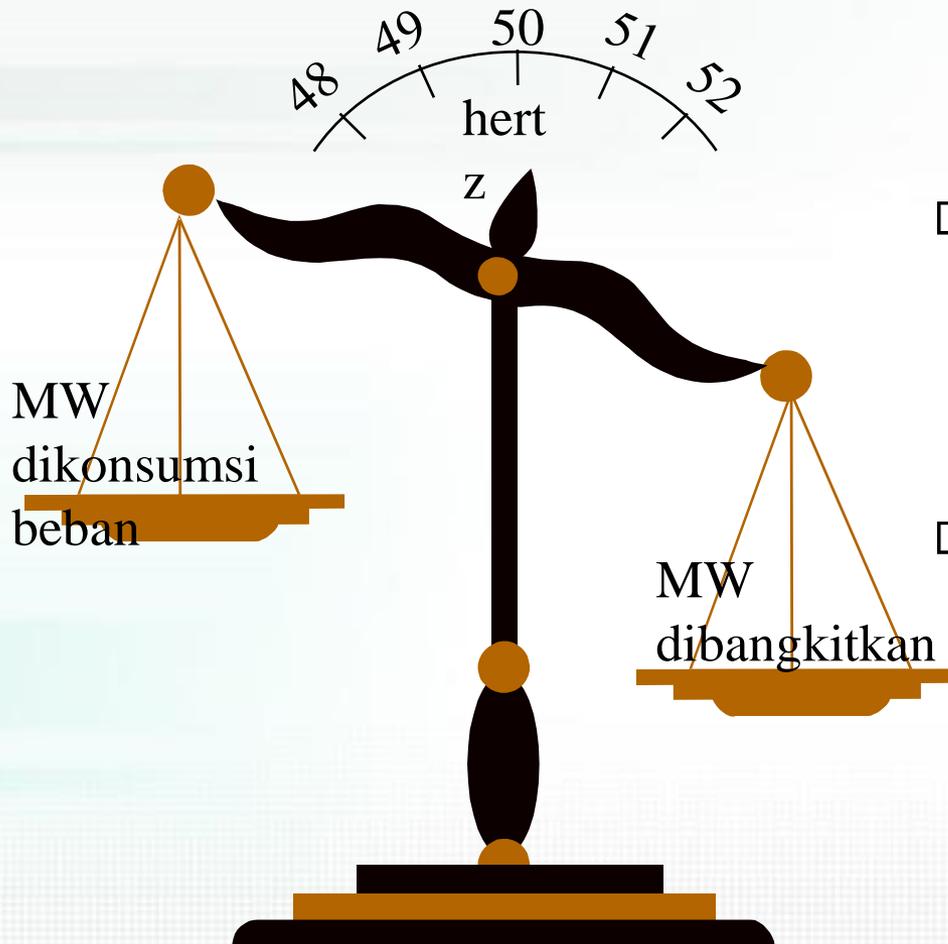


Keseimbangan beban dan pembangkitan



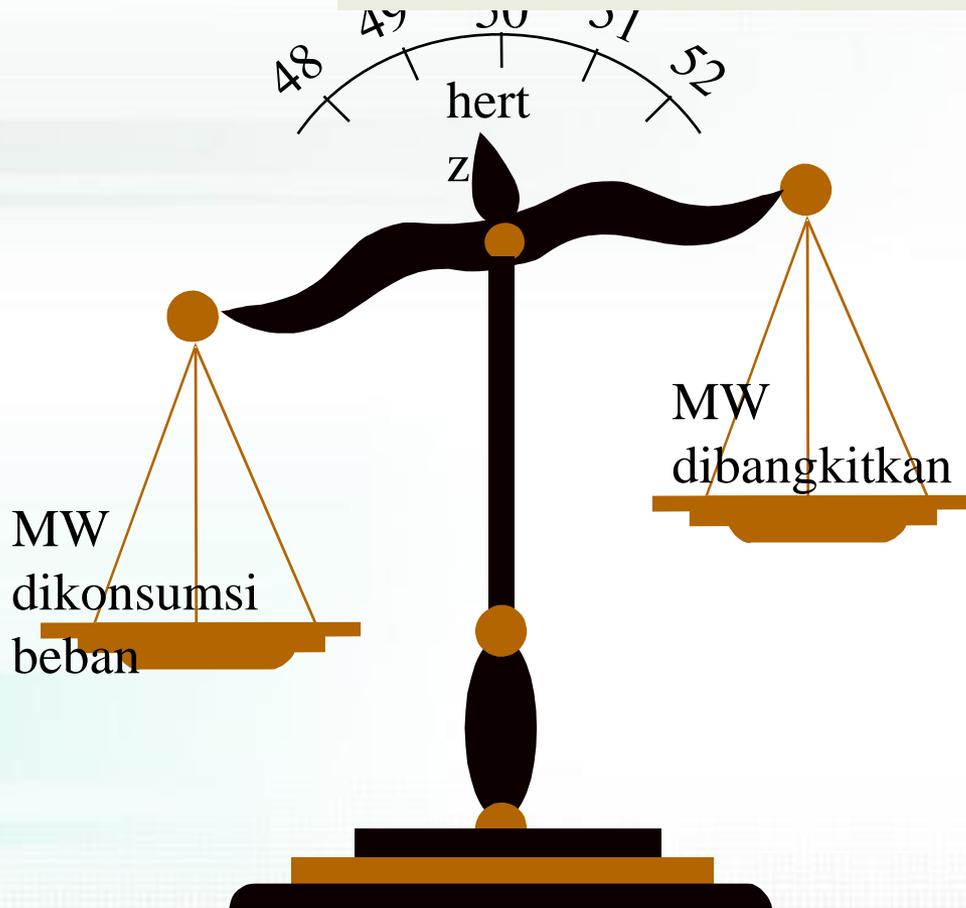
- Frekuensi sistem (hertz) menunjukkan keseimbangan sesaat antara daya nyata (MW) yang dibangkitkan dengan daya nyata (MW) yang dikonsumsi beban.
- Pada saat daya nyata yang dibangkitkan = daya nyata yang dikonsumsi beban, frekuensi = 50 hertz.

Pengaturan Frekuensi Sistem

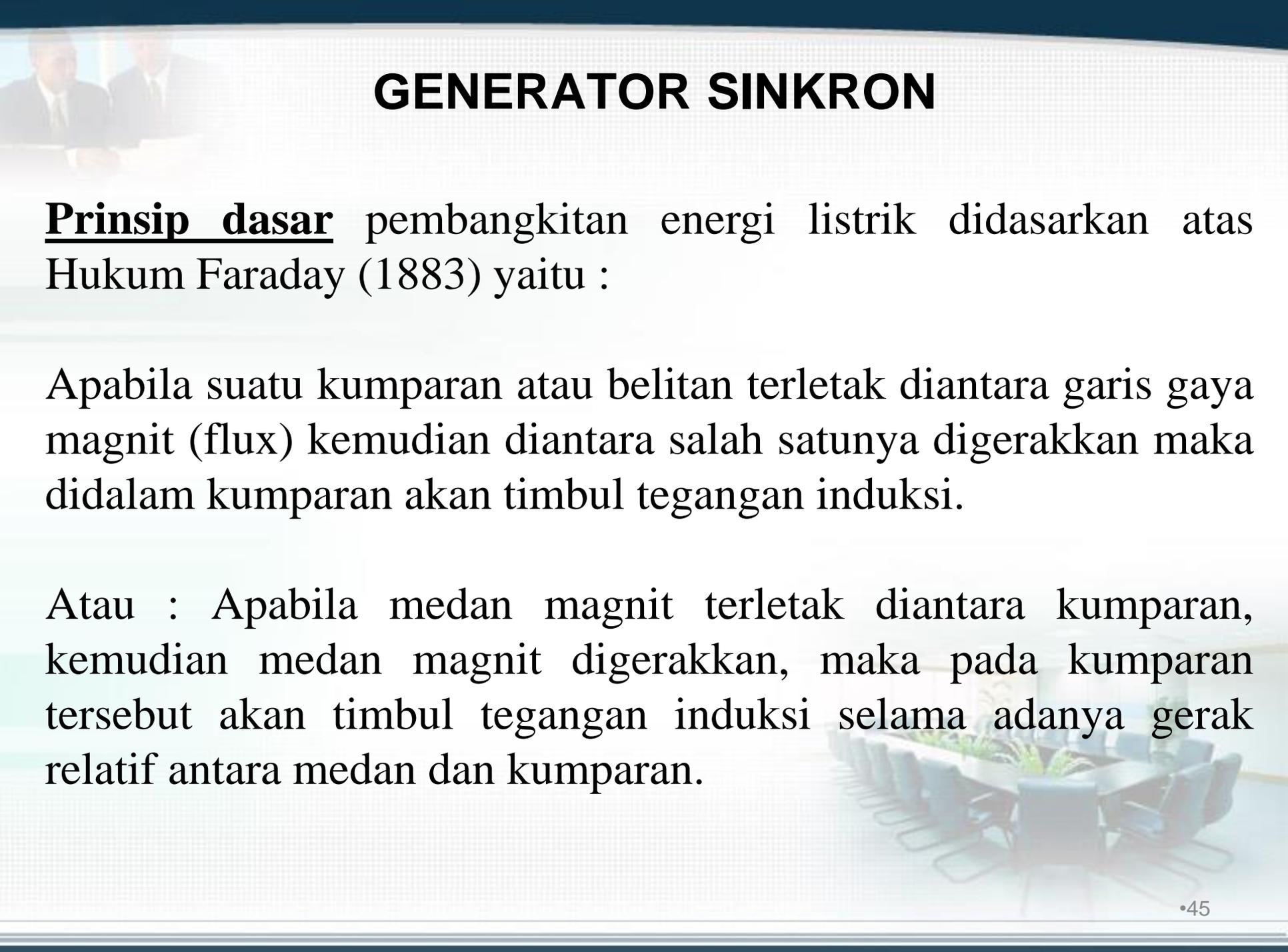


- Pada saat daya nyata yang dibangkitkan $>$ daya nyata yang dikonsumsi beban, frekuensi $>$ 50 hertz.
- Mengurangi daya (MW) yang dibangkitkan, agar frekuensi kembali ke 50 hertz.

Pengaturan Frekuensi Sistem



- Pada saat daya nyata yang dibangkitkan $<$ daya nyata yang dikonsumsi beban, frekuensi $<$ 50 hertz.
- Menambah daya (MW) yang dibangkitkan, agar frekuensi kembali ke 50 hertz.



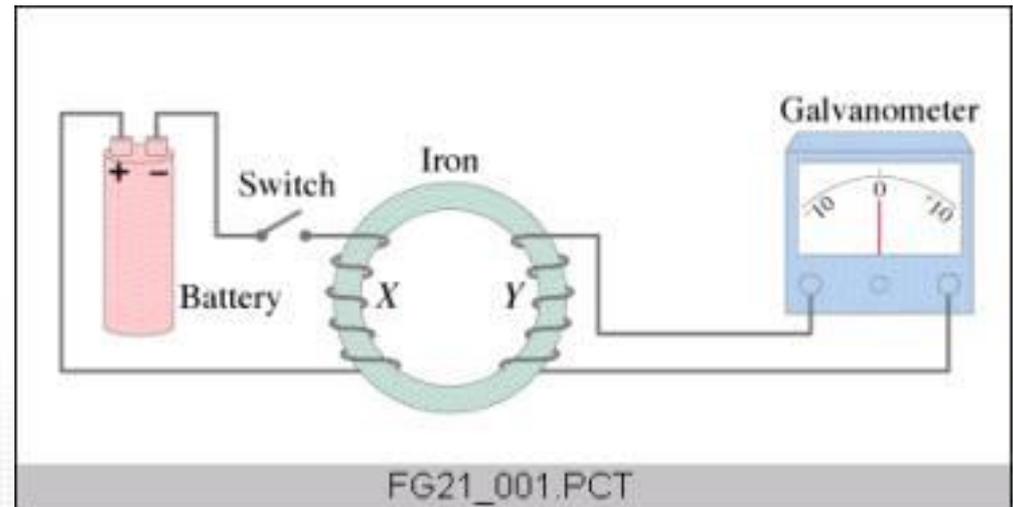
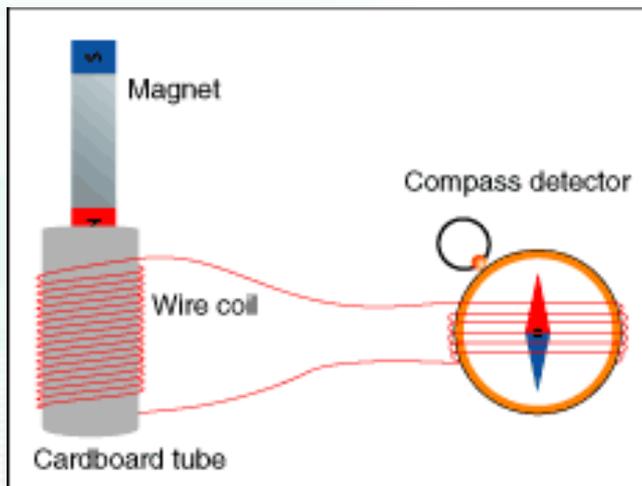
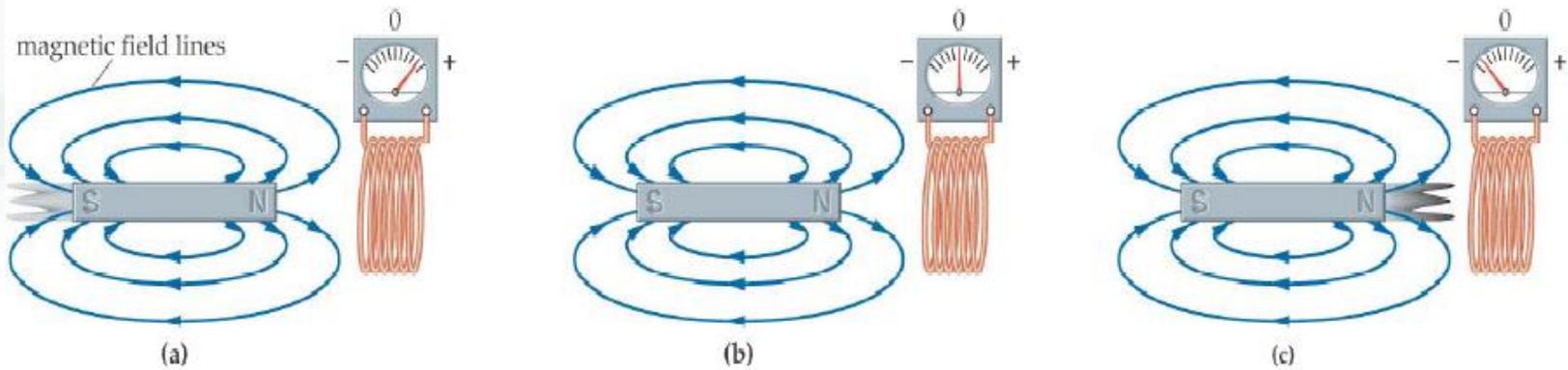
GENERATOR SINKRON

Prinsip dasar pembangkitan energi listrik didasarkan atas Hukum Faraday (1883) yaitu :

Apabila suatu kumparan atau belitan terletak diantara garis gaya magnet (flux) kemudian diantara salah satunya digerakkan maka didalam kumparan akan timbul tegangan induksi.

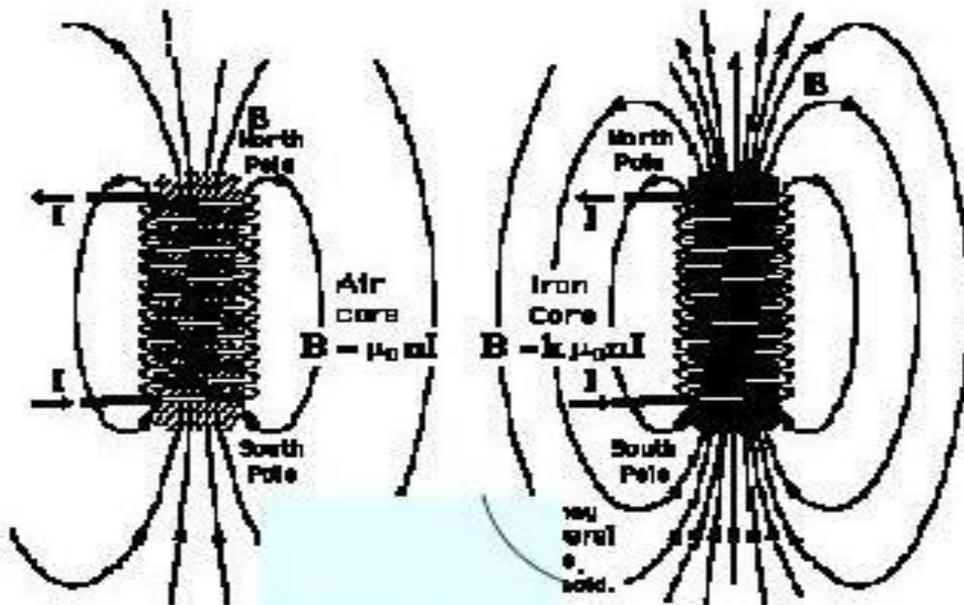
Atau : Apabila medan magnet terletak diantara kumparan, kemudian medan magnet digerakkan, maka pada kumparan tersebut akan timbul tegangan induksi selama adanya gerak relatif antara medan dan kumparan.

Prinsip kerja Generator



Prinsip Kerja Generator Listrik

ELECTROMAGNET



Bila besi selenoids dililit oleh kawat, yang diberi arus I , Maka besi tersebut akan mengandung magnet yang menyebar kekanan dan kekiri.

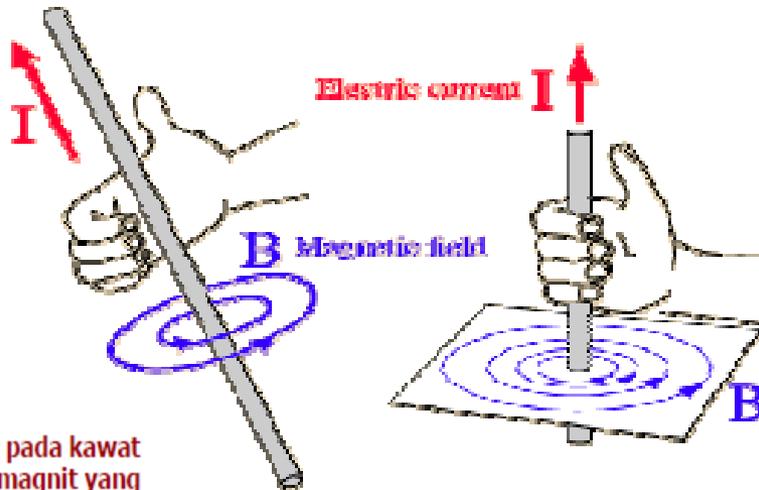
CATANAN:

Dalam inti besi akan menerima medan magnet 100 kali lebih besar dari medan magnet di udara

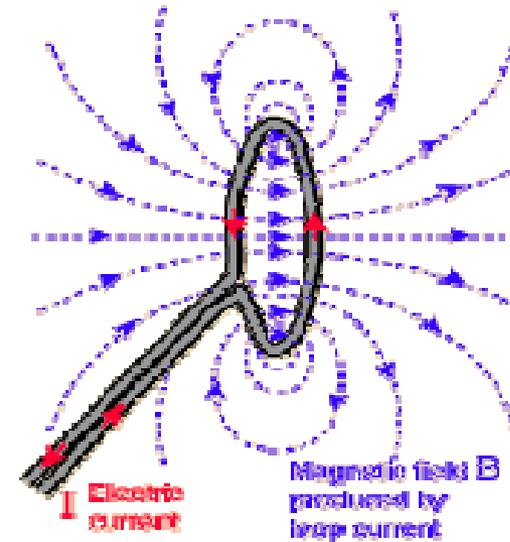
Prinsip ini dipergunakan untuk pembuatan peralatan listrik Seperti:

- Current Transformer
- Potensial transformer
- Trafo tenaga

Proses terjadinya medan magnet



Arus listrik mengalir pada kawat akan terjadi medan magnet yang mengelilingi kawat.



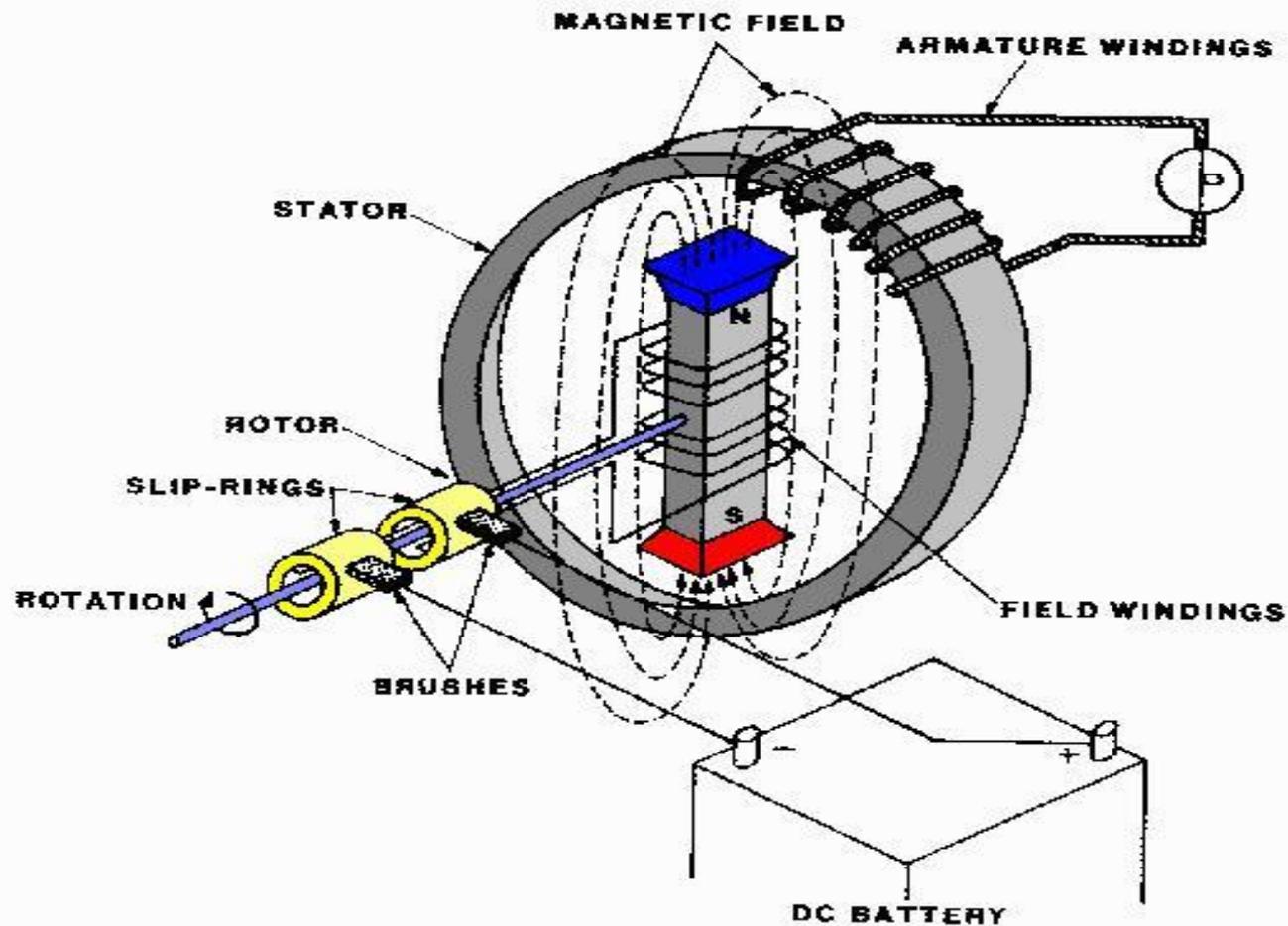
BESARNYA MEDAN MAGNET:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

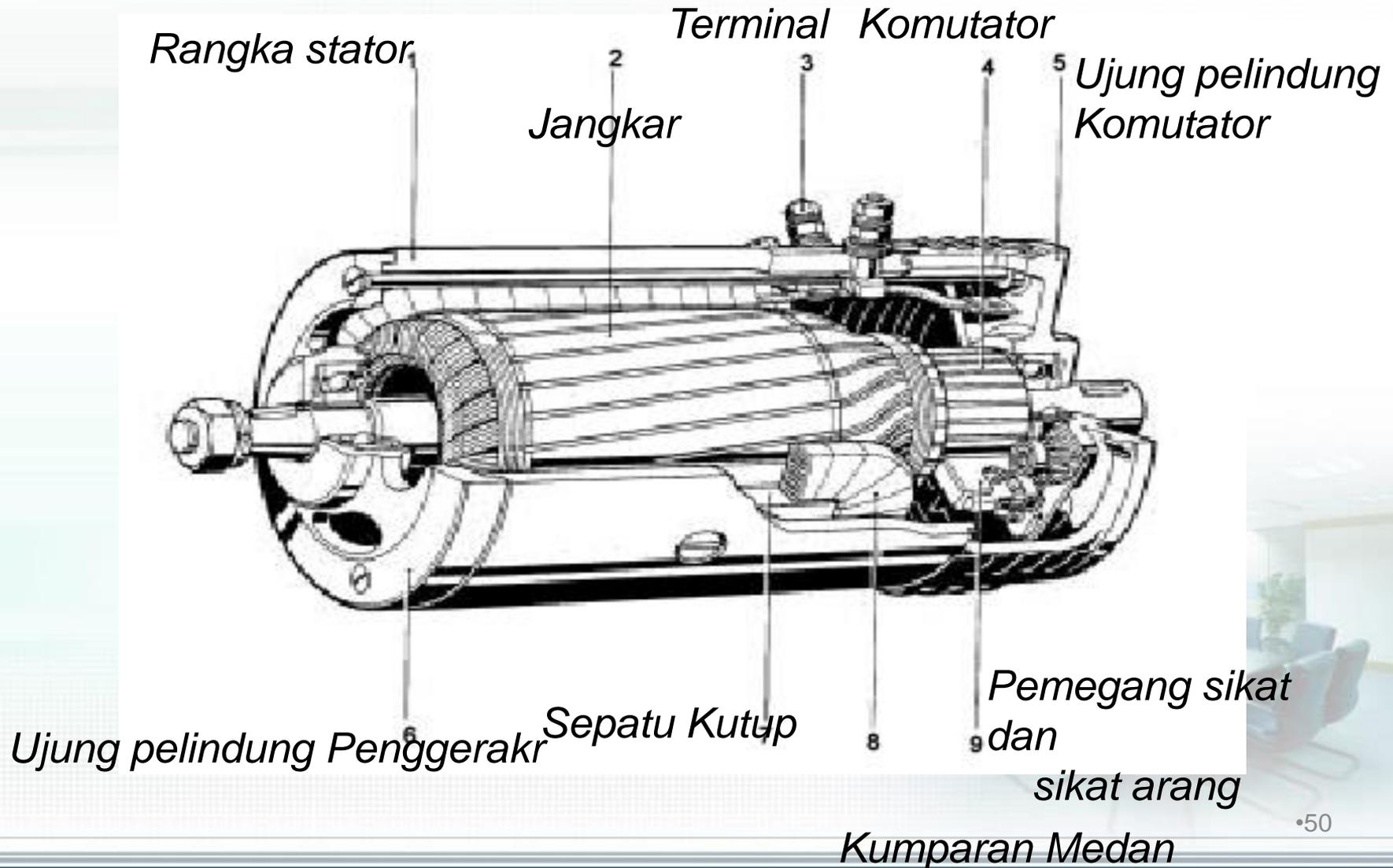
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} / \text{A}$$

- Sebuah kawat melingkar dialiri arus I menghasilkan medan magnet B
- Medan magnet melingkar keluar sepanjang lingkaran kawat

Prinsip kerja Generator



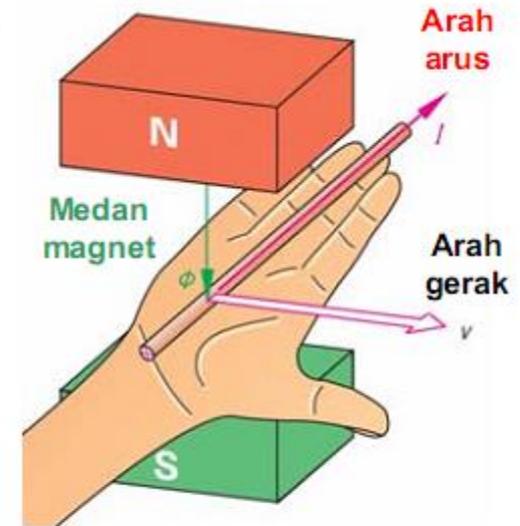
BAGIAN GENERATOR



Prinsip Pembangkitan Tegangan pada Generator

$$V = B \cdot \ell \cdot v \cdot z \text{ (volt)}$$

- V = tegangan induksi (volt)
- B = kerapatan flux magnet (weber)
- ℓ = panjang kawat penghantar (meter)
- z = jumlah penghantar
- v = kec. gerak kawat (m/s)



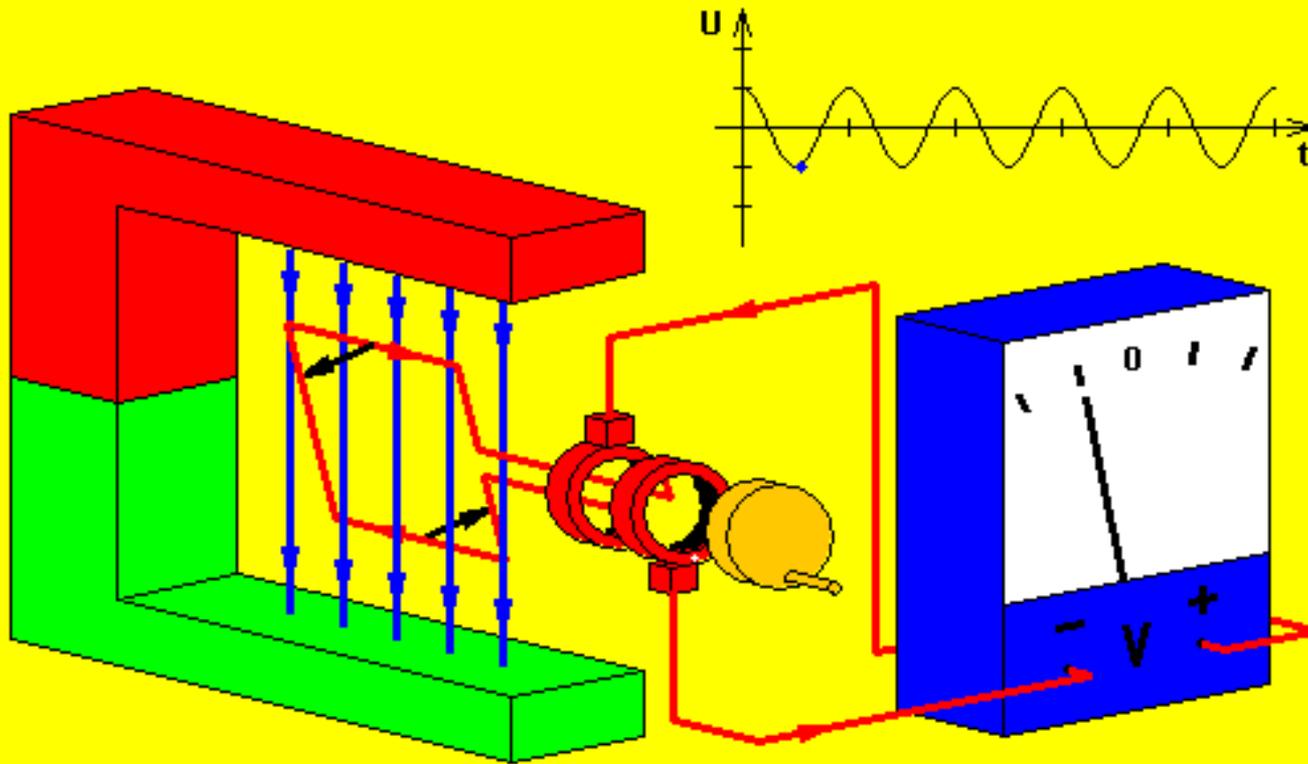
Fachkunde Elektrotechnik, 2006, hal 95

Gambar 4.3: Hukum tangan kanan untuk generator

Prinsip generator: Medan magnet dan gerakan sepotong penghantar yang dialiri arus akan menimbulkan tegangan

Apabila didalam medanmagnetterdapat 1 batang konduktor yang digerakkan maka konduktotr tersebut terbangkit gaya gerak listrik

Prinsip kerja Generator AC



- Without commutator
- With commutator

Change direction



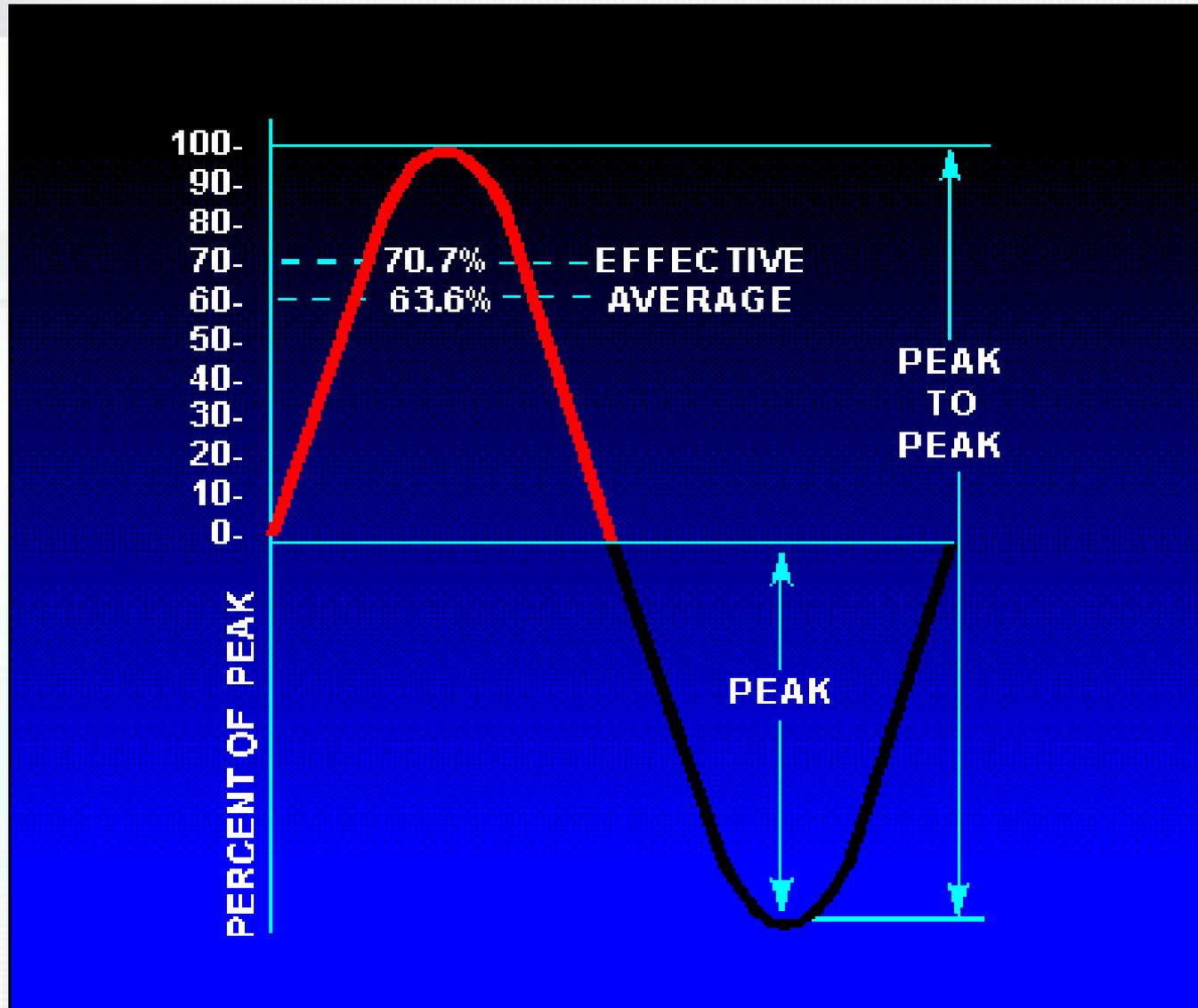
6.0 rot/min

Pause / Resume

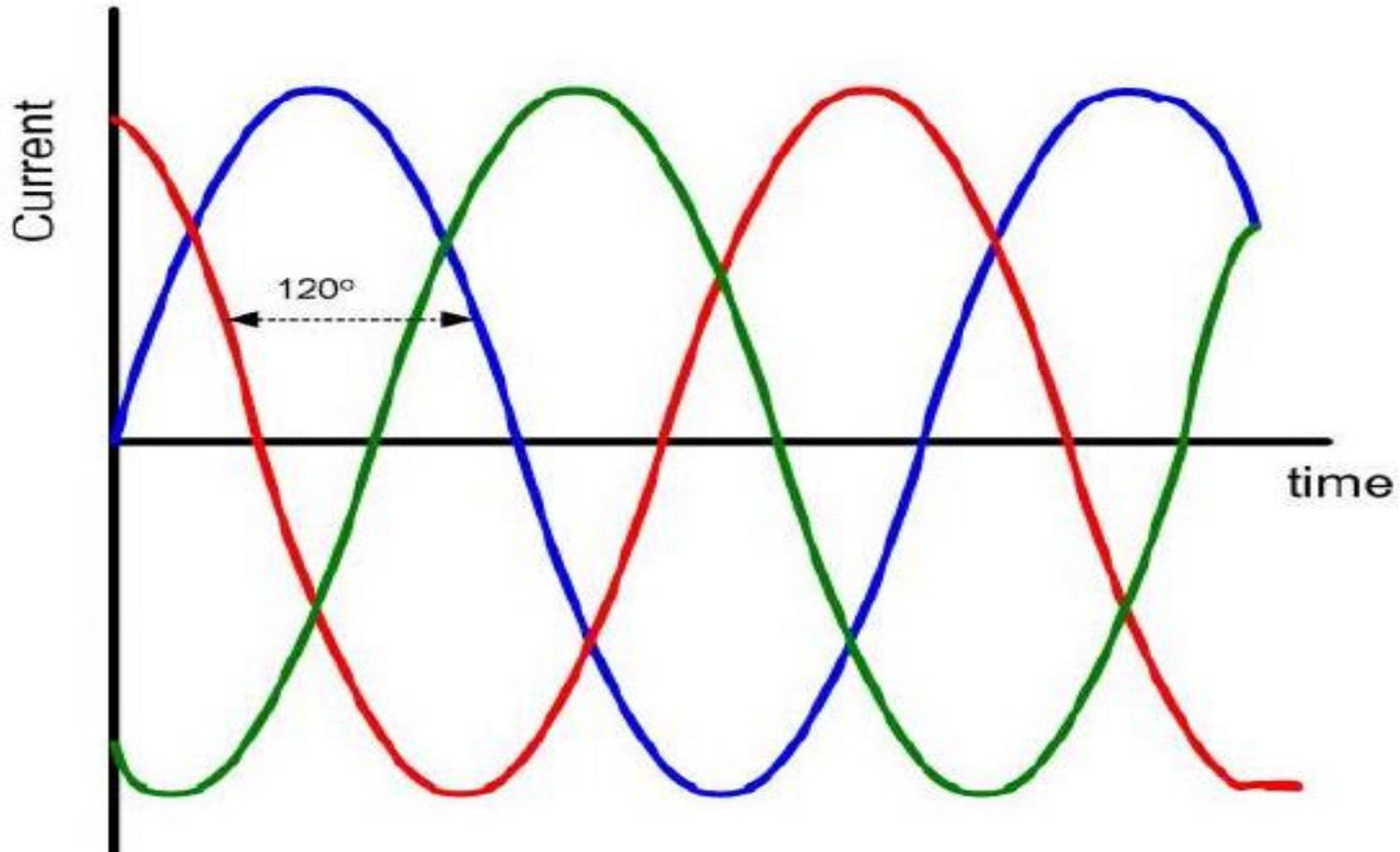
- Direction of movement
- Magnetic field
- Induced current

© W. Fendt 1998

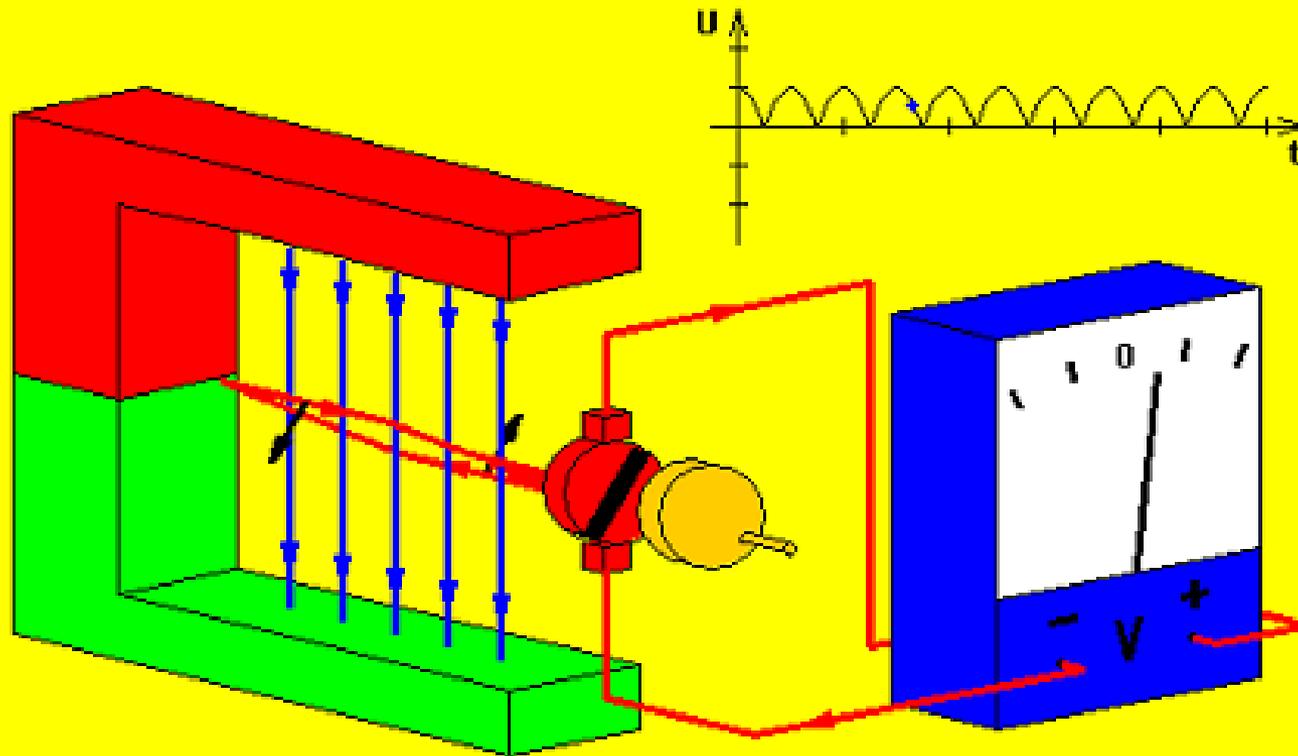
Gelombang 1 Phase



Gelombang 3 Phase



Prinsip kerja Generator DC



- Without commutator
- With commutator

Change direction

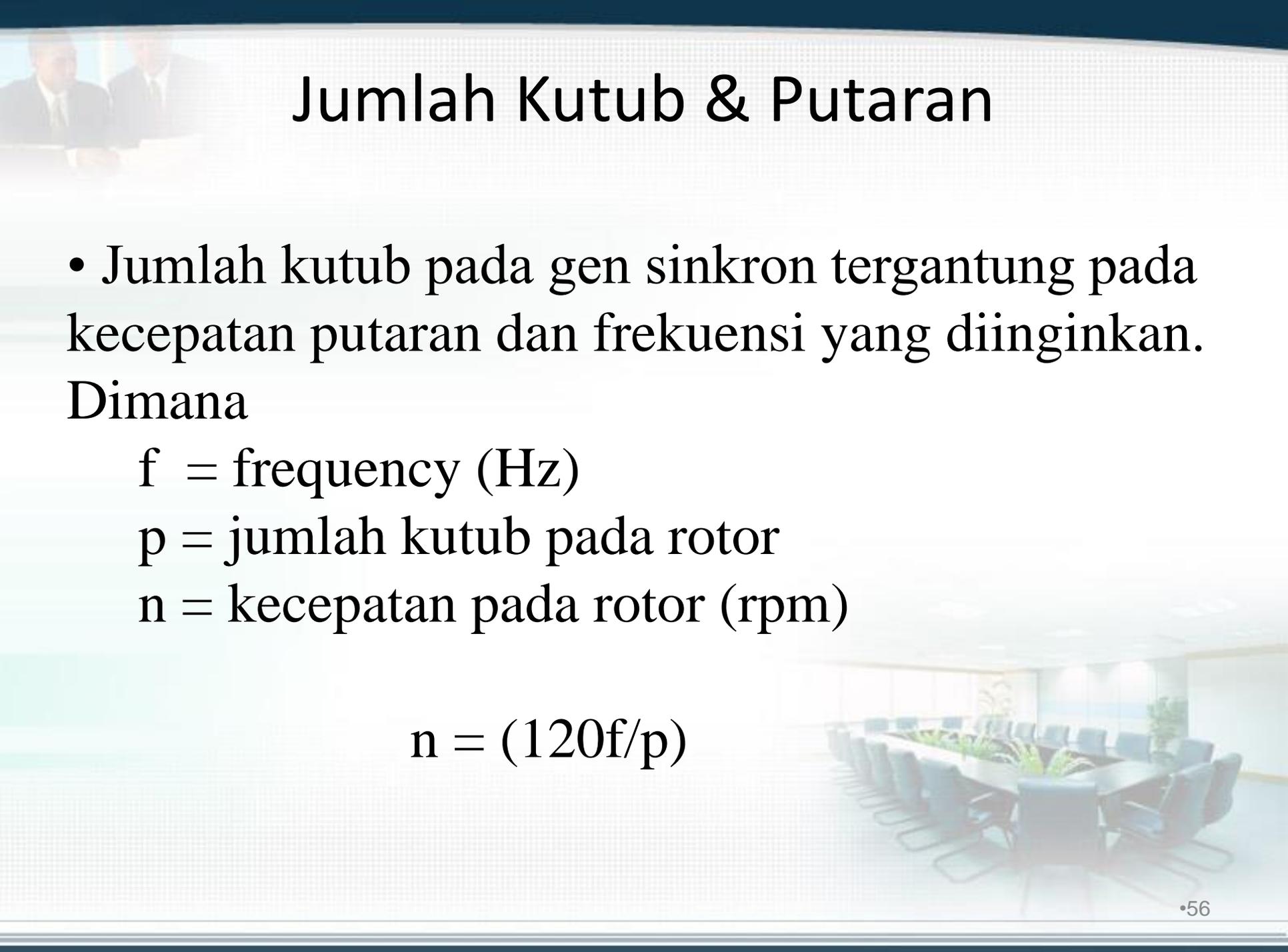


6.0 rot./min

Pause / Resume

- Direction of movement
- Magnetic field
- Induced current

© W. Fendt 1998



Jumlah Kutub & Putaran

- Jumlah kutub pada gen sinkron tergantung pada kecepatan putaran dan frekuensi yang diinginkan.

Dimana

f = frequency (Hz)

p = jumlah kutub pada rotor

n = kecepatan pada rotor (rpm)

$$n = (120f/p)$$

GENERATOR SINKRON

Secara matematik dapat ditulis rumus sebagai berikut dimana:

$$E_o = C N.\emptyset$$

E_o = Tegangan induksi atau Gaya Gerak Listrik (GGL)

C = Kontanta mesin

N = Jumlah putaran

\emptyset = Fluks yang dihasilkan

Tegangan induksi (GGL) akan terjadi jika suatu penghantar yang bergerak diletakkan pada suatu medan magnet yang diam.

Tegangan induksi (GGL) akan terjadi juga jika suatu penghantar yang diam diletakkan pada medan magnet yang berputar.



GENERATOR SINKRON

Cara menghasilkan energi listrik pada Generator:

1. Fluks diam dan kumparan bergerak, disebut Generator kutub luar.
2. Fluks bergerak dan kumparan diam, disebut Generator kutub dalam.

Syarat utama Generator Listrik :

- Harus ada penghantar (Conductor)
- Harus ada medan magnet (Fluks)
- Harus ada gerakan atau putaran



Proses Dasar Pembangkitan

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ detik.}$$

Untuk Generator yang di rancang pada frekuensi ($F = 50 \text{ Hz}$) dan mempunyai kecepatan 3000 RPM, maka kutub yang terpasang (P) dapat dihitung dengan rumus :

$$P = \frac{60.F}{N}$$

Dimana :

F = frekuensi

P = pasang kutub

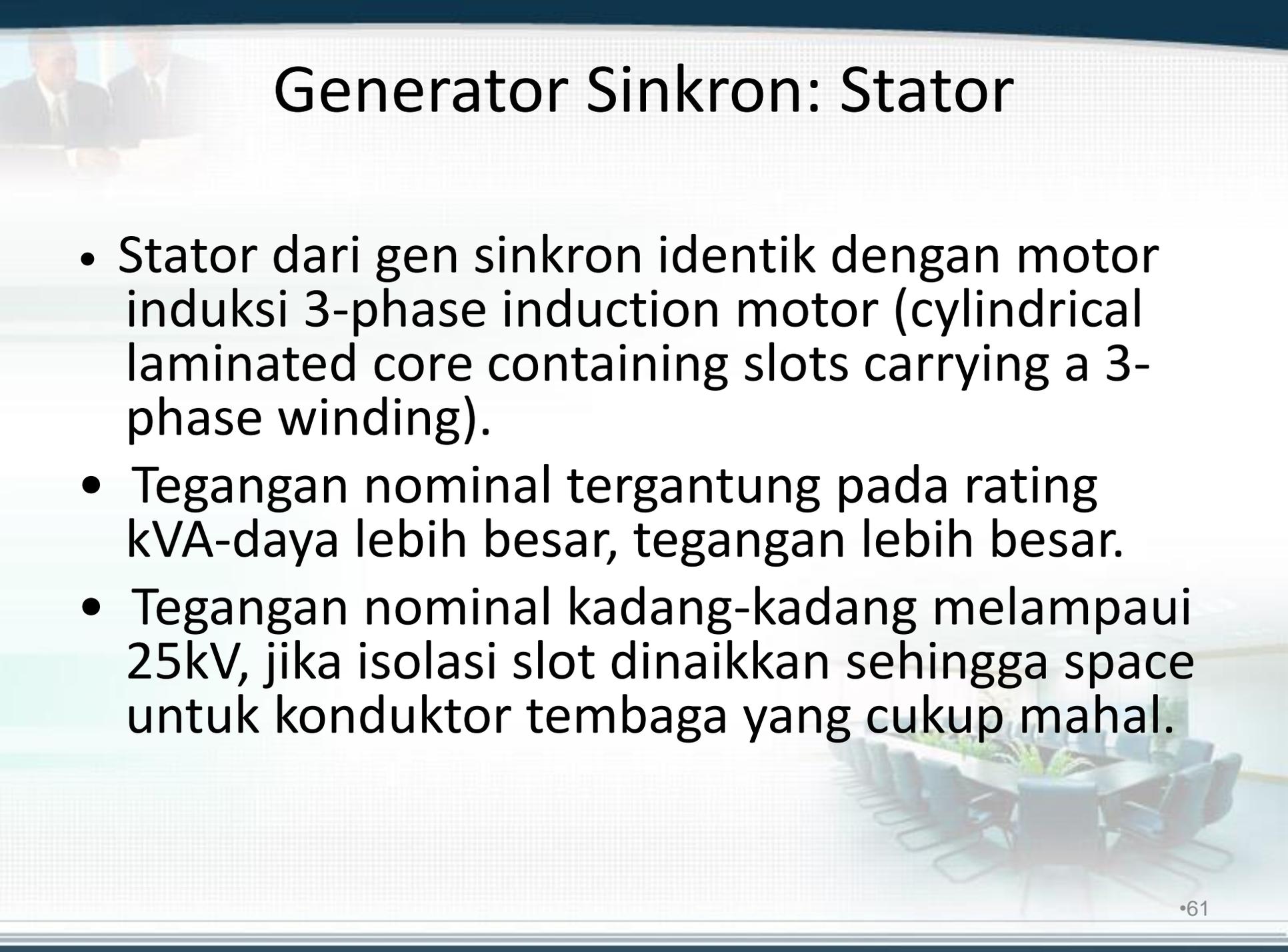
N = putaran permenit

60 = konversi dari menit kedetik

Proses Dasar Pembangkitan

$$P = \frac{120 \cdot F}{N}$$

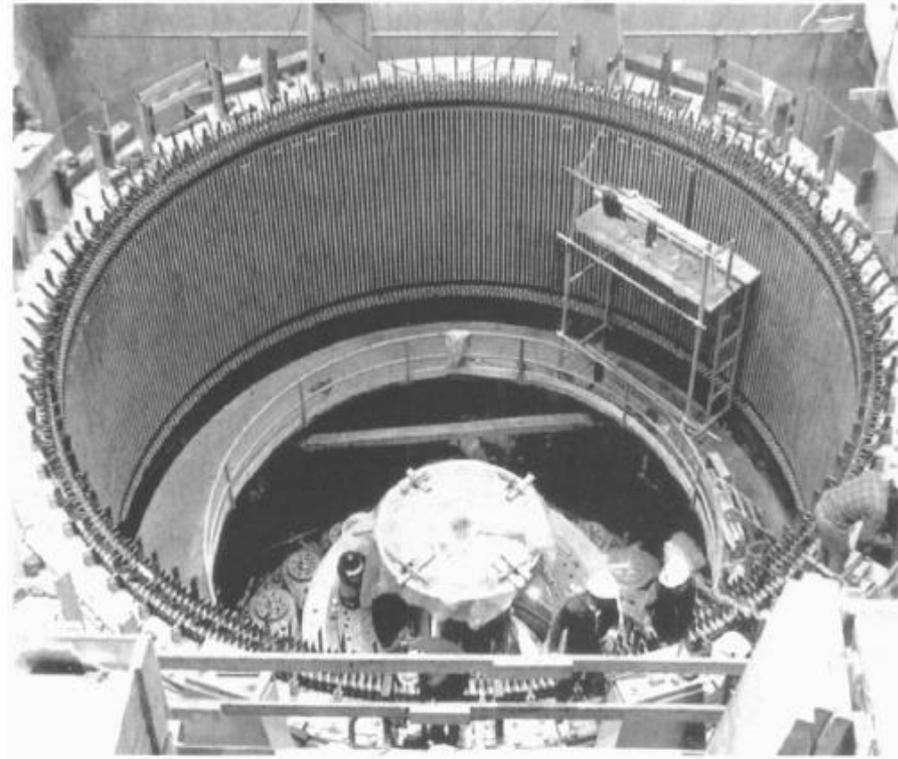
- Untuk mencari jumlah kutub, dapat digunakan rumus seperti diatas.
- Pada praktiknya, Generator yang dirancang untuk dioperasikan pada putaran tinggi akan mempunyai jumlah kutub yang lebih sedikit, sedang mesin-mesin yang dioperasikan pada putaran rendah mempunyai jumlah kutub yang lebih banyak untuk mendapatkan frekuensi standar yaitu 50 HZ atau 60 Hz.



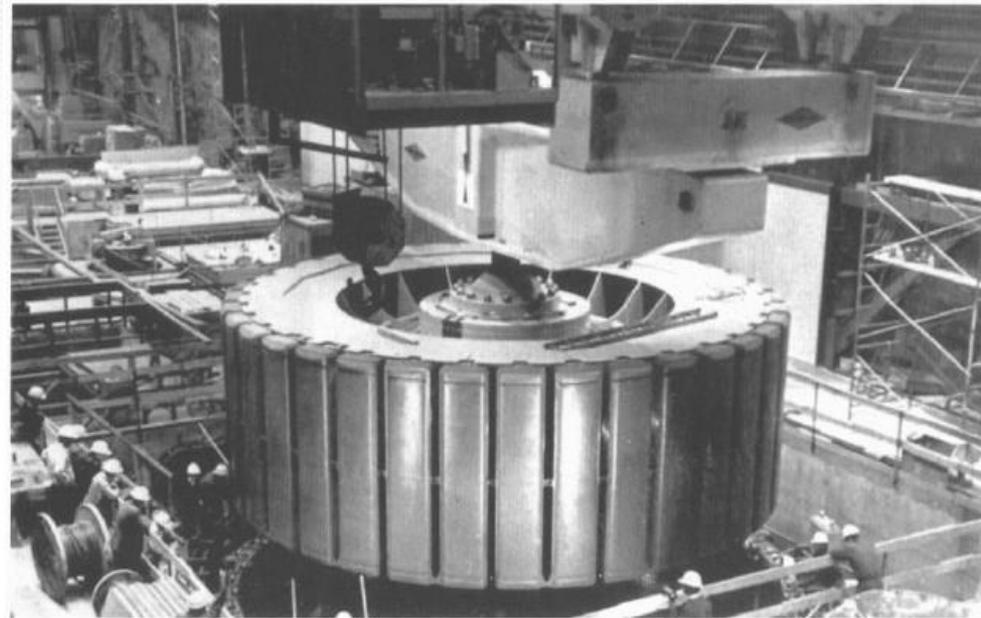
Generator Sinkron: Stator

- Stator dari gen sinkron identik dengan motor induksi 3-phase induction motor (cylindrical laminated core containing slots carrying a 3-phase winding).
- Tegangan nominal tergantung pada rating kVA-daya lebih besar, tegangan lebih besar.
- Tegangan nominal kadang-kadang melampaui 25kV, jika isolasi slot dinaikkan sehingga space untuk konduktor tembaga yang cukup mahal.

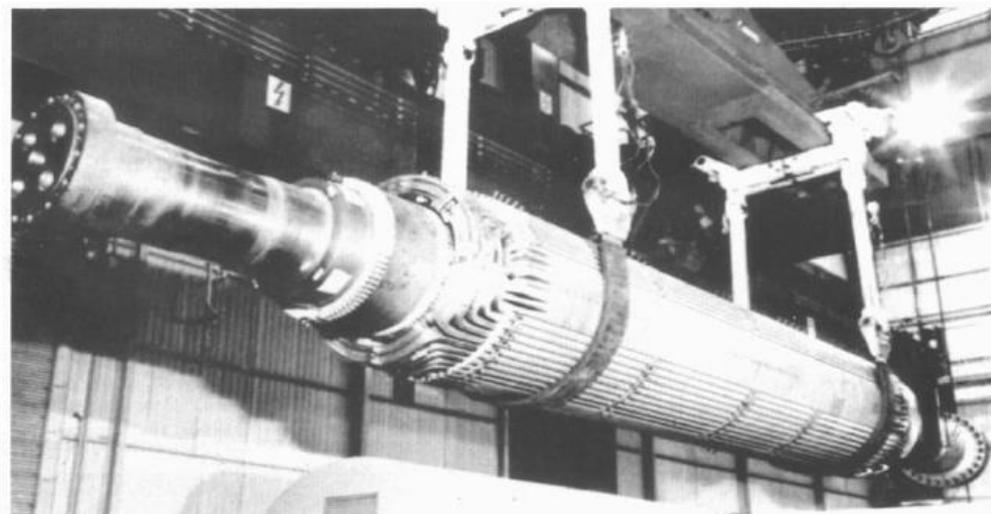
Synchronous Generator:



Stator



Rotor



Jenis dari Generator Sinkron

- **Medan tetap (Stationary field)**

Kutub pada stator(kumparan medan) dicatu dengan sumber dc untuk menghasilkan medan magnet stationary.

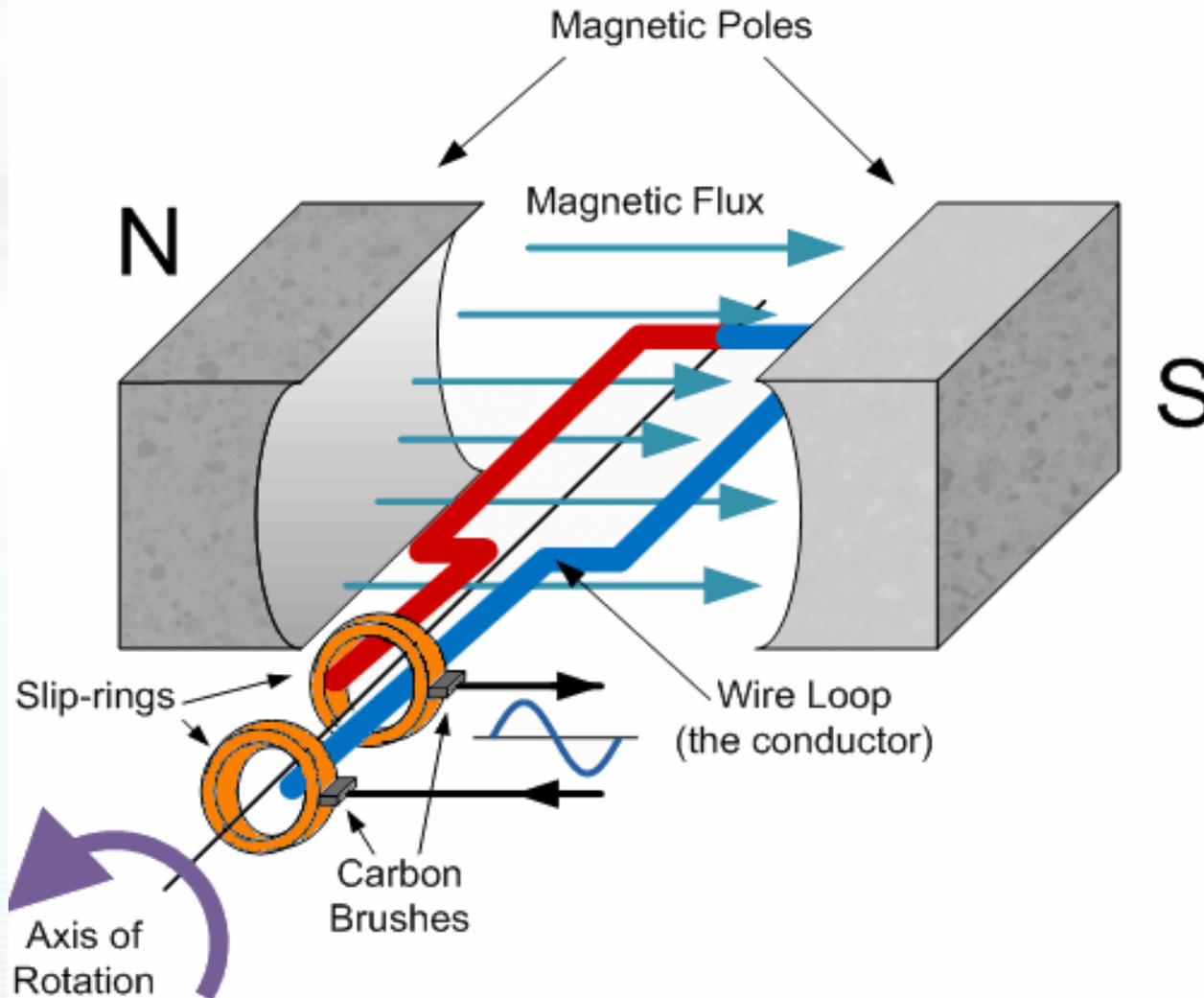
- Kumparan Armature pada rotor terdiri dari kumparan 3-phase yang terminal-terminalnya terhubung ke 3 slip-ring pada poros.
- Sikat-sikat (brushes) menghubungkan armatur ke beban external 3-phase.
- Jenis ini dipakai pada mesin daya rendah(<5kVA). Untuk daya yang lebih tinggi menggunakan tipe medan revolving.

- **Medan berputar (Revolving field)**

Umumnya disebut juga sebagai *alternator*

- **Stationary armature dengan belitan 3-phase pada stator terhubung langsung dengan beban.**
- **Medan magnet putar dihasilkan oleh kumparan medan DC pada rotor, yang dicatu melalui slip-rings / brushes**

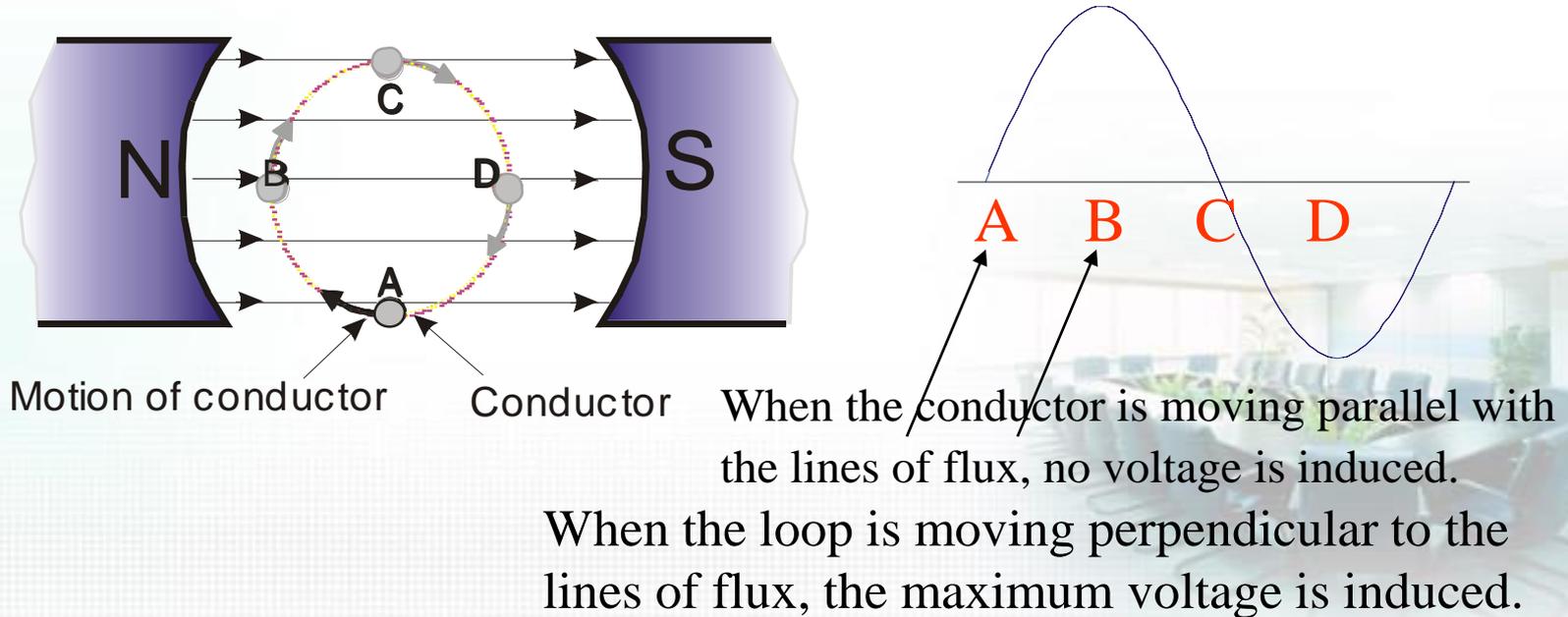
Basic Single Coil AC Generator



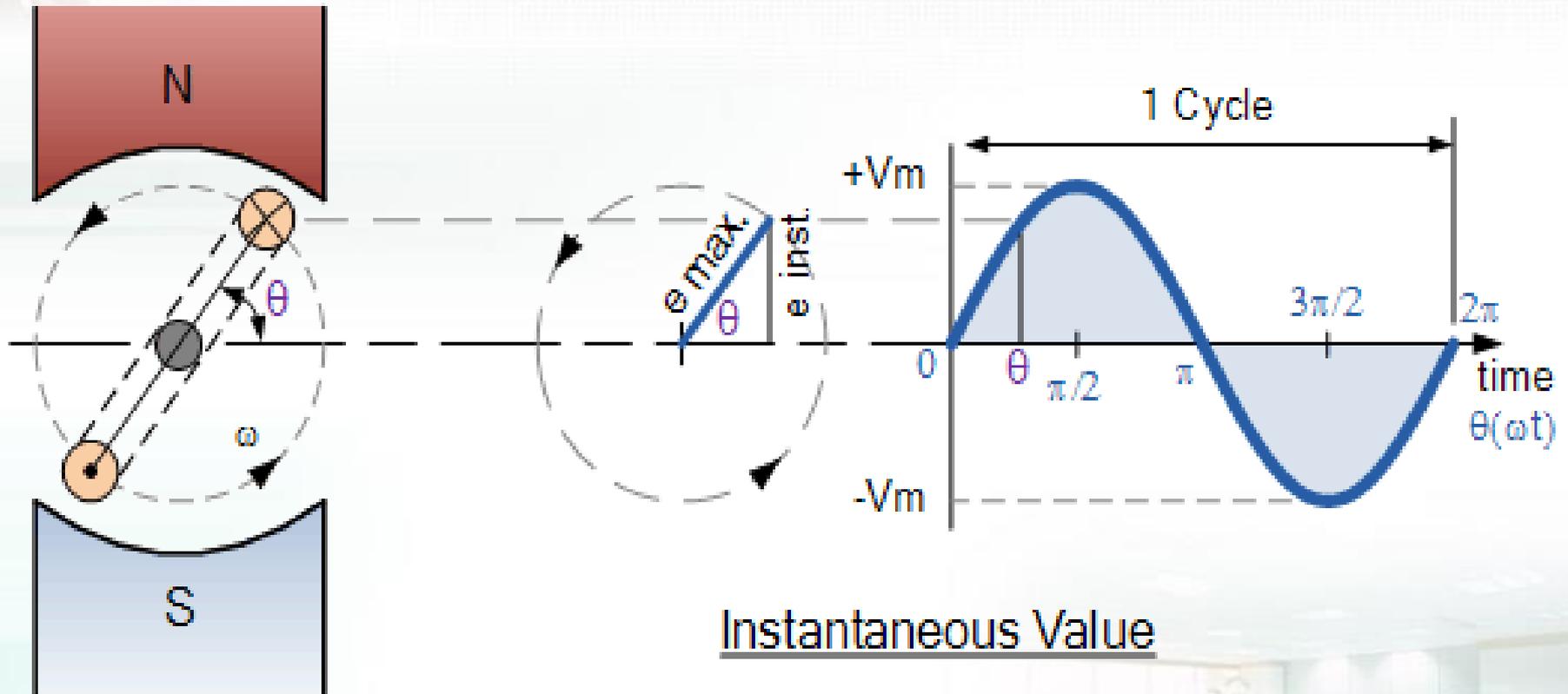
Generation of a sine wave

Sinusoidal voltages are produced by ac generators and electronic oscillators.

When a conductor rotates in a constant magnetic field, a sinusoidal wave is generated.



Displacement of a Coil within a Magnetic Field



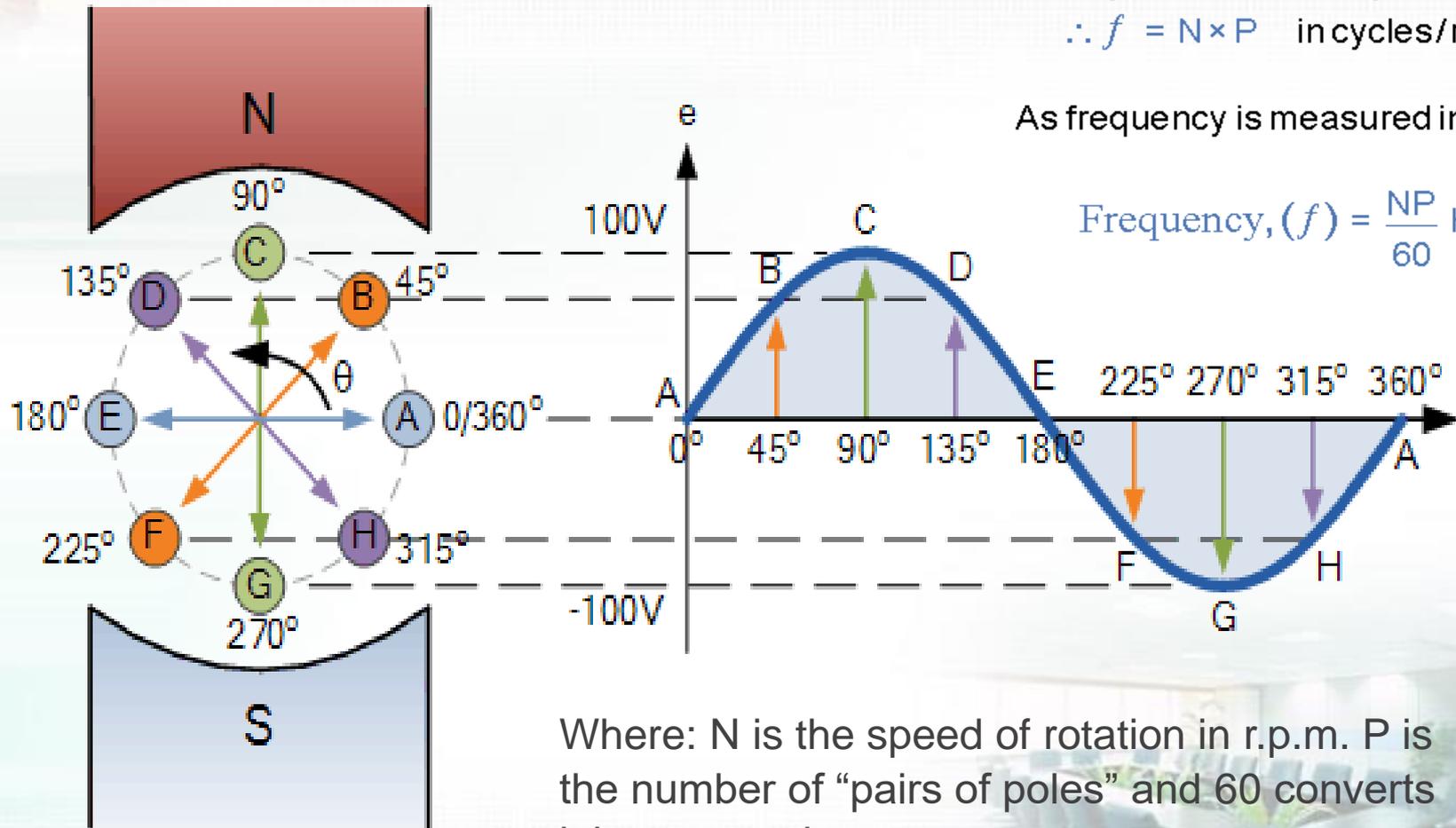
Sinusoidal Waveform Construction

$$f \propto N, \text{ and } f \propto P$$

$$\therefore f = N \times P \text{ in cycles/min}$$

As frequency is measured in Hertz

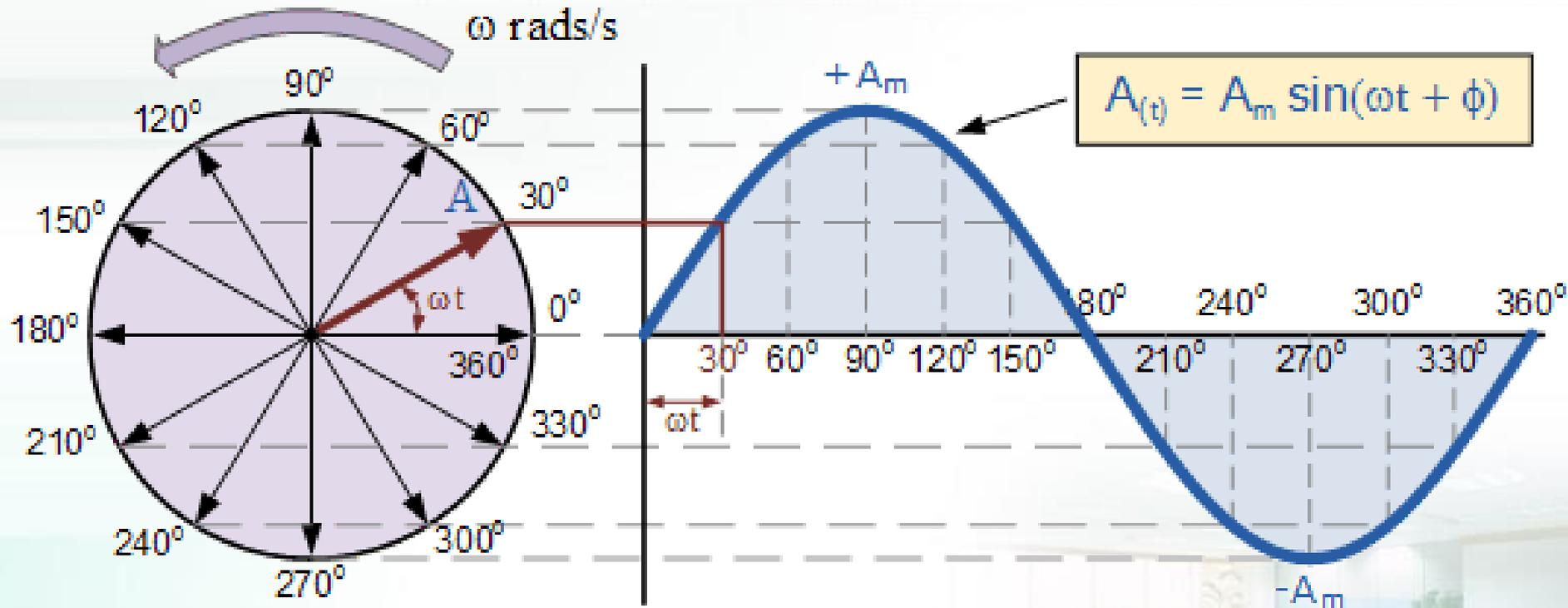
$$\text{Frequency, } (f) = \frac{NP}{60} \text{ Hz}$$



Where: N is the speed of rotation in r.p.m. P is the number of “pairs of poles” and 60 converts it into seconds.

Phasor Diagram of a Sinusoidal Waveform

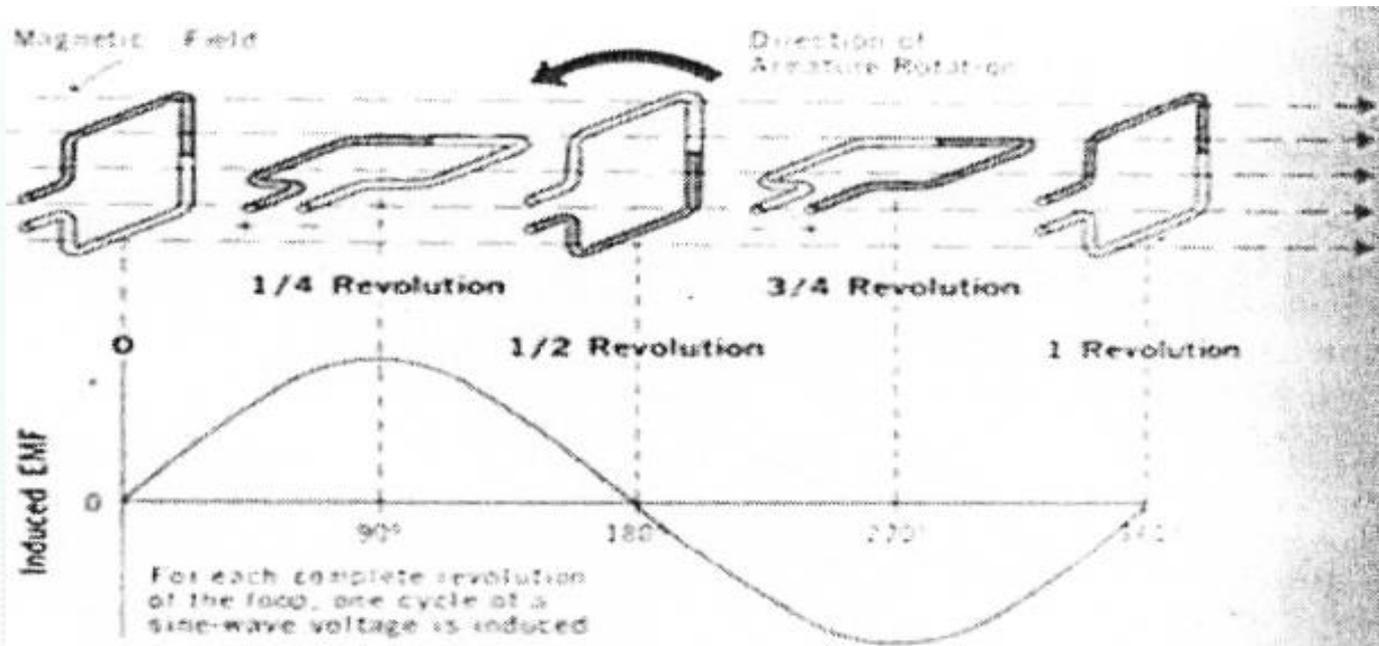
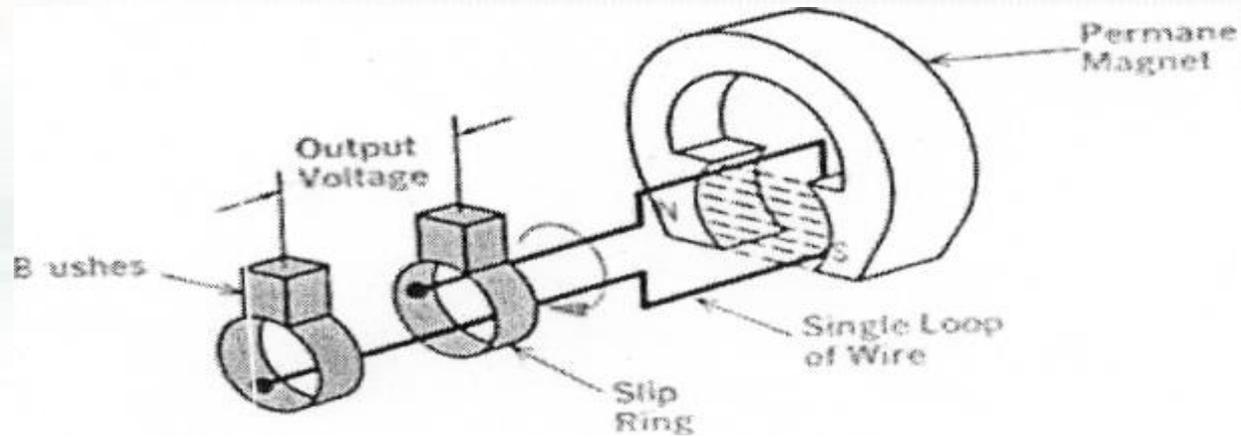
Vector rotation



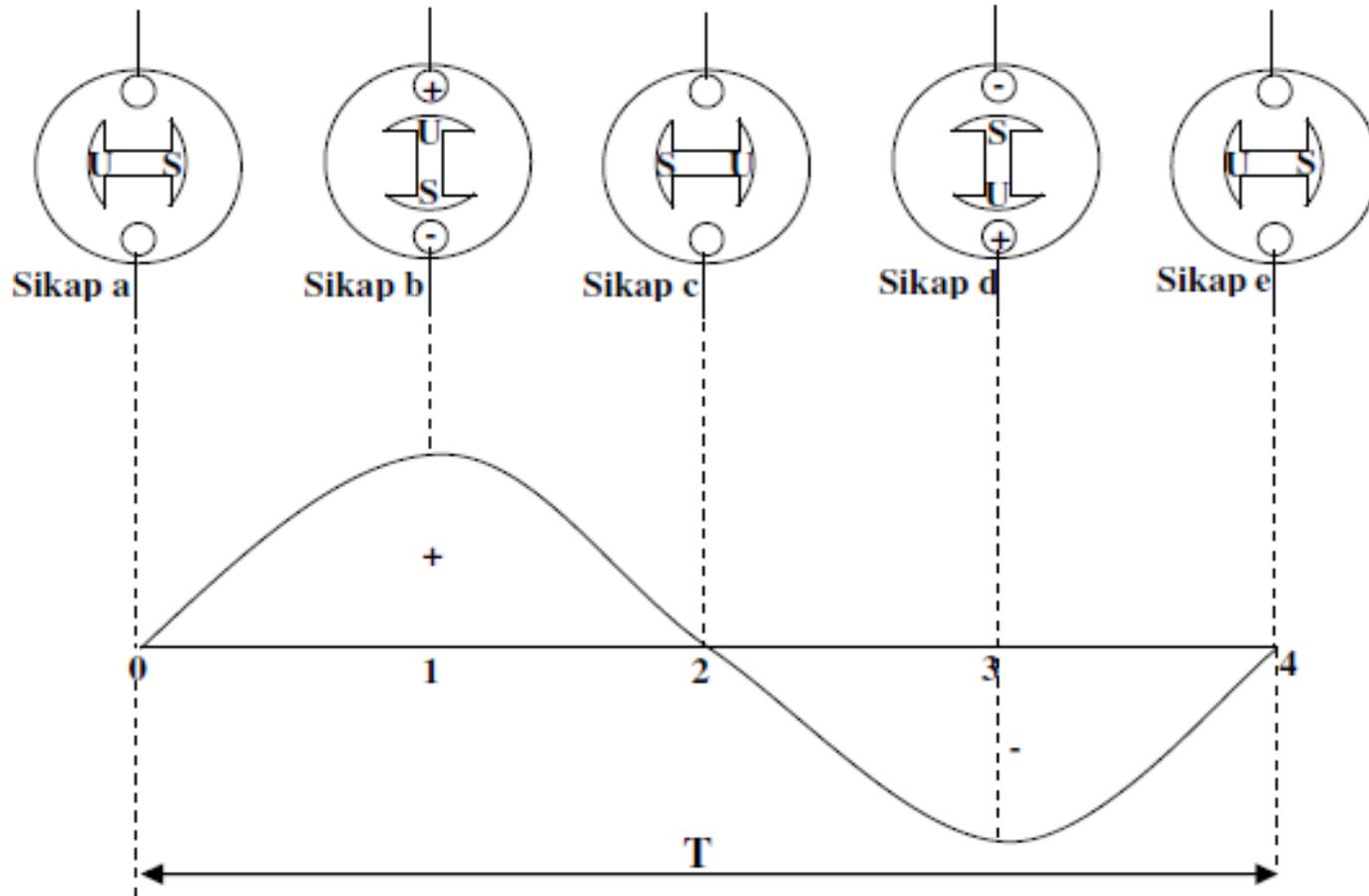
Rotating Phasor

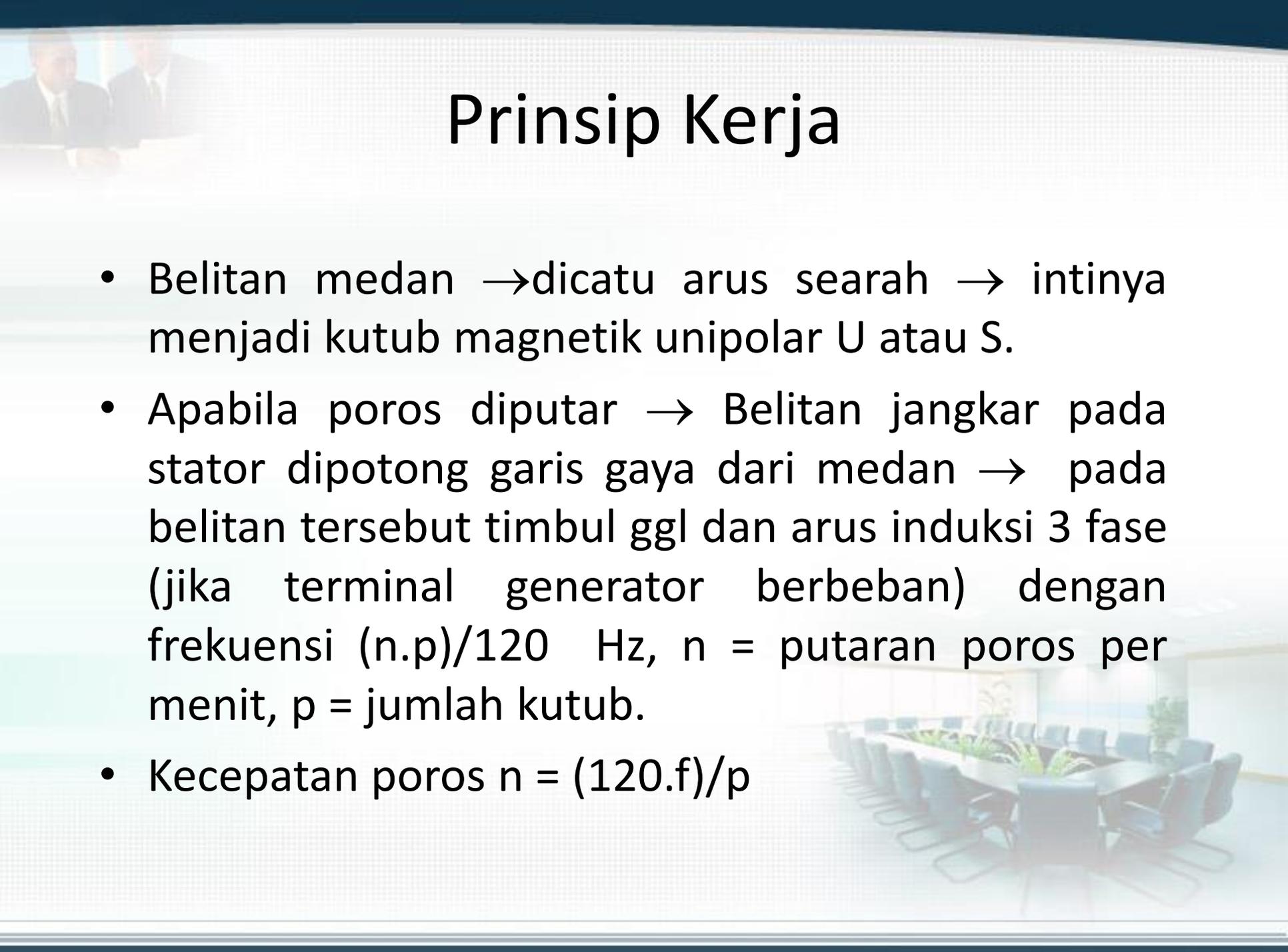
Sinusoidal Waveform in the Time Domain

Proses terjadinya medan magnet



Proses terjadinya medan magnet

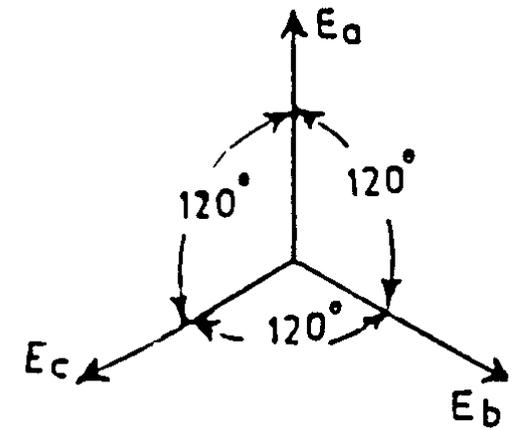
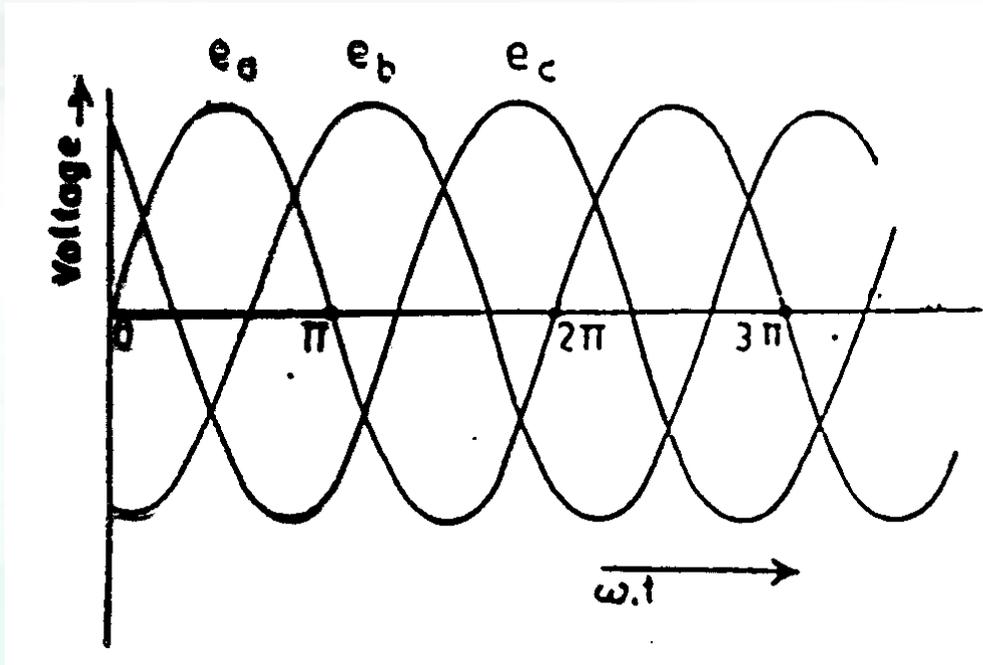




Prinsip Kerja

- Belitan medan \rightarrow dicatu arus searah \rightarrow intinya menjadi kutub magnetik unipolar U atau S.
- Apabila poros diputar \rightarrow Belitan jangkar pada stator dipotong garis gaya dari medan \rightarrow pada belitan tersebut timbul ggl dan arus induksi 3 fase (jika terminal generator berbeban) dengan frekuensi $(n.p)/120$ Hz, n = putaran poros per menit, p = jumlah kutub.
- Kecepatan poros $n = (120.f)/p$

PRINSIP KERJA...



Gelombang AC tiga fase

PRINSIP KERJA...

PEMBANGKITAN TEGANGAN

- Kumputaran medan diberi arus eksitasi dc
- Rotor diputar pada kecepatan sinkron
- Pada jangkar di stator terbangkit EMF (GGL) sebesar :
 - $E = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N$ volt rms dengan frekuensi $f = (n_s \cdot p) / 120$ untuk pitch penuh, lihat gambar 7.
 - $E = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot \phi \cdot f \cdot N$ volt rms untuk fractional pitch penuh
 - K_d = faktor distribusi
 - K_p = faktor pitch

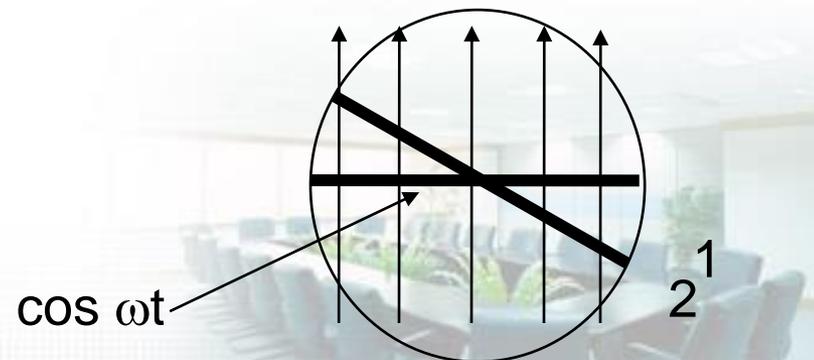
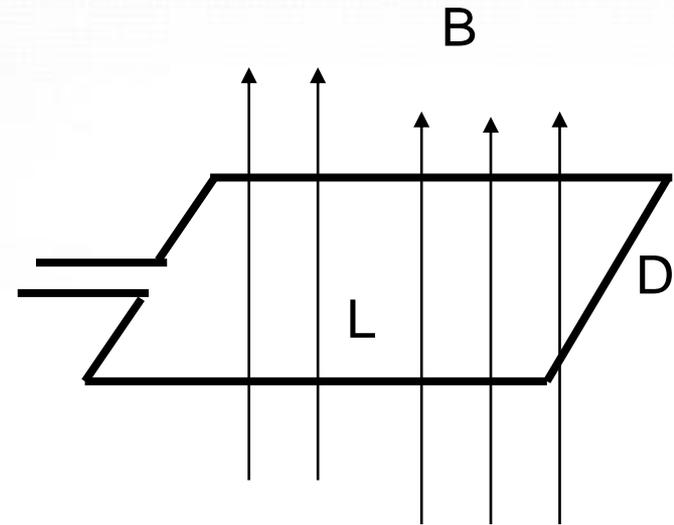
PRINSIP KERJA...

Pembangkitan tegangan generator

- Loop kawat diputar dalam medan magnet.
 - N : jumlah lilit dalam loop
 - L : panjang loop
 - D : lebar loop
 - B : rapat fluks magnetik
 - n : putaran per detik

$$\Phi(t) = BDL \cos(\omega t)$$

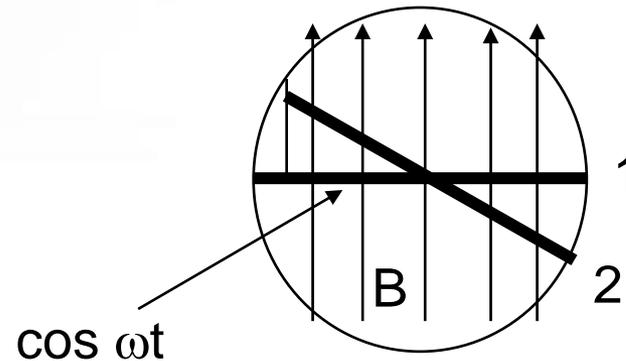
$$\omega = 2\pi n$$



PRINSIP KERJA...

Pembangkitan tegangan generator

- Posisi 1 semua fluks melingkupi loop.
- Posisi 2 flux linkage berkurang.
- Perubahan flux linkage menginduksikan tegangan pada loop.



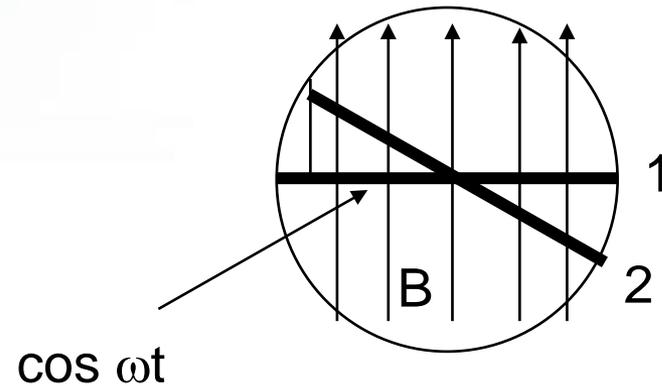
$$V(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = NBDL \frac{d[\cos(\omega t)]}{dt} = NBDL \omega \sin(\omega t)$$

PRINSIP KERJA...

Pembangkitan tegangan generator

- Tegangan induksi adalah tegangan AC
- Tegangan sinusoidal
- Nilai rms tegangan induksi pada loop :

$$V_{\text{rms}} = \frac{NBDL \omega}{\sqrt{2}}$$



- View the animation of voltage generation



PRINSIP KERJA...

- Relasi frekuensi Hz-kecepatan rpm :

$$f = (p / 2) n_s = p n_s / 2$$

p : jumlah pole.

- Tipikal kecepatan rotor 3600 rpm utk 2-pole, 1800 rpm utk 4 pole and 450 rpm utk 16 pole.
- Nilai rms tegangan induksi:

$$\mathbf{E}_{an} = \mathbf{E}_{rms} e^{i0deg} \quad \mathbf{E}_{bn} = \mathbf{E}_{rms} e^{-i120deg} \quad \mathbf{E}_{cn} = \mathbf{E}_{rms} e^{-i240deg}$$

• dengan:

$$\mathbf{E}_{rms} = \frac{k_w \omega N_a \Phi_f}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_a \Phi_f k_w$$

$k_w = 0.85-0.95$: winding factor $k_w = K_d \cdot K_p$



PRINSIP KERJA...

REAKSI JANGKAR

- Reaksi jangkar tergantung :
 - Besar beban
 - Tipe beban (faktor daya beban)
- Generator berbeban \rightarrow ketiga fase arus jangkar \rightarrow fluks pada celah udara
- Sifat fluks arus jangkar memperkuat / memperlemah fluks utama
- GGL $\rightarrow E_g = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot \phi_g \cdot f \cdot N$ volt
 - ϕ_g = fluks resultans di celah udara atau $(\phi_m + \phi_j)$

Contoh Soal :

1. Alternator dengan data : Jumlah kurub = 8, putaran $n = 750$ rpm, faktor lilit (f_w) = 0,8; alur/kutub/fasa = 4, jumlah penghantar tiap sisi kumparan = 10 lilitan, \emptyset /Kutub = 0,004 Wb. Hitung tegangan fasa dan tegangan line terminal alternator kondisi tanpa beban dan gambarkan sambungan kumparannya jika kumparan disambung Seri Δ , single layer.

Penyelesaian :

$$E = 4,44 \cdot f_w \cdot f \cdot N \cdot \emptyset \text{ volt}$$

$$f = (4 \times 750)/60 = 50 \text{ Hz}$$

$$\text{Jumlah alur } G = 4 \times 8 \times 3 = 96 \text{ alur}$$

$$\text{Jumlah kumparan total dalam mesin (single layer)} = 1 \times 96 = 96 \text{ kumparaan}$$

$$\text{Jumlah kumparan total perfasa} = 96/3 = 32 \text{ kumparan}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah kumparan grup/fasa} &= 8 \text{ (kutub } 8)/2 \text{ (2 kutub menghasilkan 1 kumparan)} \\ &= 4 \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah kumparan tiap grup} = 32/4 = 8.$$

$$\text{Karena disambung seri, jumlah penghantar per fasa} = 4 \times 8 \times 10 = 320 \text{ lilitan}$$

$$\text{Kumparan seri, } N \text{ yang membangkitkan tegangan per fasa} = 320 \text{ lilitan.}$$

$$\mathbf{E/\text{fasa} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,8 \cdot 320 \cdot 0,004 = 227,3 \text{ V}}$$

$$\mathbf{\text{Sambungan Seri Delta : Tegangan line (delta)} = 227,3 \text{ V}}$$

$$\mathbf{\text{Tegangan fasa} = 227,3 \text{ V}}$$

2. Alternator dengan data : Jumlah kurub = 8, putaran $n = 750$ rpm, faktor lilit (f_w) = 0,8; alur/kutub/fasa = 4, jumlah penghantar tiap sisi kumparan = 10 lilitan, \emptyset /Kutub = 0,004 Wb. Hitung tegangan fasa dan tegangan line terminal alternator kondisi tanpa beban dan gambarkan sambungan kumparannya jika kumparan disambung paralel Y, double layer.

Penyelesaian :

$$\text{Jumlah alur } G = 4 \times 8 \times 3 = 96 \text{ alur}$$

$$\text{Jumlah kumparan total dalam mesin (double layer)} = 2 \times 96 = 192 \text{ kumparaan}$$

$$\text{Jumlah kumparan total perfasa} = 192/3 = 64 \text{ kumparan}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah kumparan grup/fasa} &= 8 \text{ (kutub 8)}/2 \text{ (2 kutub menghasikan} \\ &\quad \text{1 kumparan)} \\ &= 4 \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah kumparan tiap grup} = 64/4 = 16$$

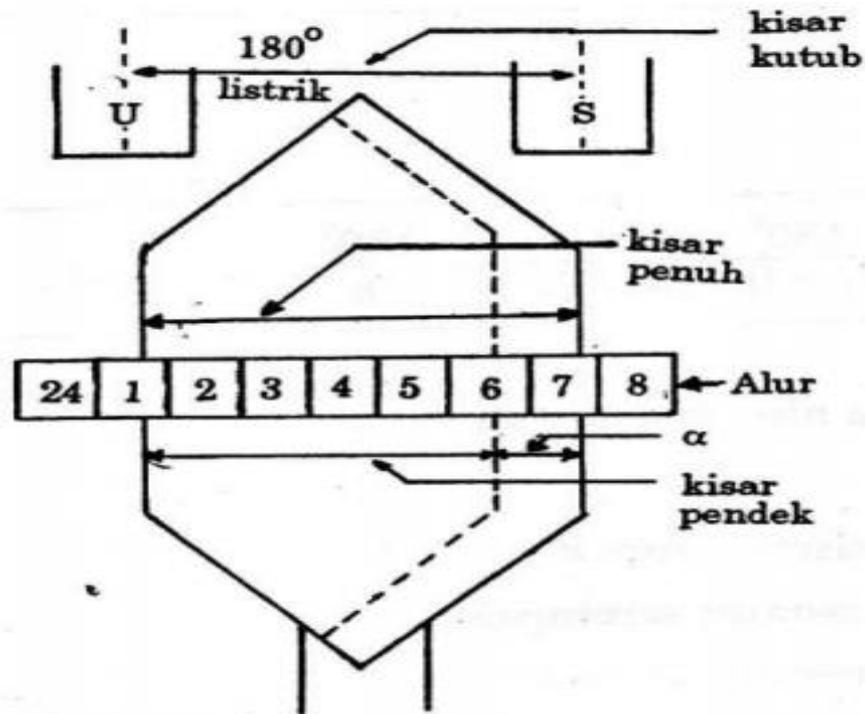
$$\begin{aligned} \text{Karena disambung parallel (4 kumparan grup diparalel) , jumlah penghantar per fasa} \\ = \mathbf{16 \times 10} = 160 \text{ lilitan} \end{aligned}$$

Kumparan oaralel, N yang membangkitkan tegangan per fasa = 160 lilitan.

$$\mathbf{E/fasa = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,8 \cdot 160 \cdot 0,004 = 113,6 \text{ V}}$$

$$\mathbf{\text{Sambungan paralel Y : Tegangan line (Y) = 113,6 } \sqrt{3} \text{ V}}$$

$$\mathbf{\text{Tegangan fasa = 113,6 V}}$$



Gambar 1.22 Kisar atau gawang lilitan jangkar

Bila jarak antara lilitan yang satu dengan yang lain kurang dari 180° listrik, lilitan tersebut dikatakan mempunyai kisar pendek (*gawang pendek*). Factor kisar (*factor gawang*) atau K_C atau K_p adalah perbandingan antara kisar pendek terhadap kisar penuhnya atau dapat dihitung dengan persamaan:

$$K_C = K_p = \cos \alpha / 2 \quad (1.9)$$

Faktor Distribusi

Lilitan jangkar pada tiap fasa tidak dipusatkan hanya pada satu alur / slot tetapi didistribusikan pada beberapa alur / slot menyebabkan suatu factor yang disebut faktor distribusi (kd) yang dapat dihitung dengan persamaan :

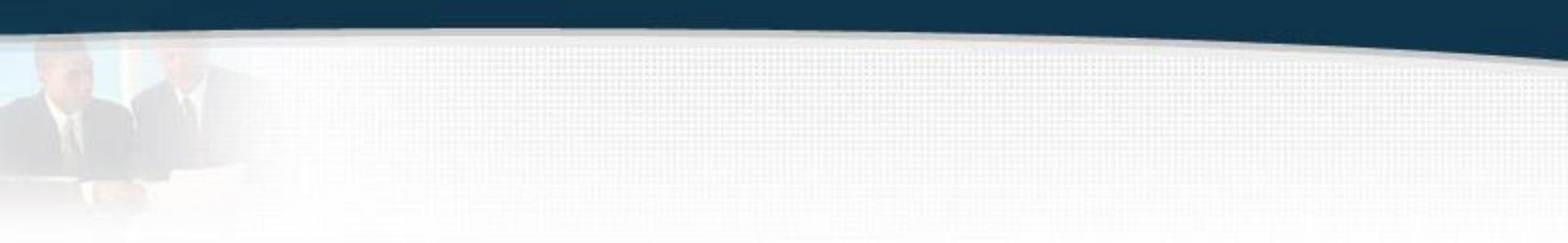
$$K_d = \frac{\text{Sin}(m\beta / 2)}{m \cdot \text{Sin}(\beta / 2)} \quad (1.10)$$

Dengan

$$\beta = \frac{180^\circ}{\text{banyaknya} - \text{alur} - \text{perkutub}} = \frac{180^\circ}{n} \quad (1.11)$$

m = Banyaknya alur/fase/kutub





Contoh soal 1.2 :

Suatu generator sinkron tiga fase, 4 kutub , 50 Hz mempunyai 15 alur perkutub, tiap alur berisi 10 penghantar. Setiap penghantar dari tiap fase dihubungkan seri dengan faktor distribusi 0,95 dan factor kisar 1. Pada waktu beban nol, EMF antara fasa adalah 1825 volt. Hitunglah besarnya fluks perkutub dari generator ini.



Penyelesaian contoh soal 1.2:

Dari persoalan di atas dapat diketahui bahwa:

$$p = 4, f = 50 \text{ Hz},$$

$$K_C = 1$$

$$K_d = 0,95$$

jumlah penghantar per alur = 10

$$\text{EMF/fase} = E_p = 1825 / \sqrt{3} \text{ volt}$$

$$\text{Banyaknya alur} = 4 \times 15 = 60$$

$$\text{Banyaknya alur per fase} = 60 / 3 = 20$$

Banyaknya lilitan per fase:

$$T = 20 \times 10 / 2 = 100$$

Selanjutnya, dengan mengacu ke persamaan (1.7), maka diperoleh hasil:

$$1825 / \sqrt{3} = 4,44 \times 1 \times 0,95 \times 50 \times \Phi \times 100$$

Dari hasil ini kemudian diperoleh hasil fluks per kutub sebagai berikut.

$$\Phi = \frac{1825 / \sqrt{3}}{4,44 \times 1 \times 0,95 \times 50 \times 100} = 49,97 \times 10^{-3} \text{ Wb} = 49,97 \text{ mWb}$$



Contoh soal 1.3:

Hitung kecepatan dan tegangan per fase serta tegangan antar fase dari suatu generator sinkron 4 kutub, tiga fase, 50 Hz, hubungan Y dengan 36 alur (slot), tiap slot berisi 30 penghantar (sisi lilitan). Fluks per kutub 0,05 Weber terdistribusi sinusoidal.



Penyelesaian Contoh 1.3

$$f = \frac{Nr.p}{120} \rightarrow N = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ Rpm}$$

Selanjutnya dengan mengacu ke persamaan (1.11) diperoleh:

$$\beta = \frac{180^0}{36/4} = 20^0$$

$$m = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Dan dari persamaan (1.10) juga diperoleh:

$$K_d = \frac{\sin(3 \times 20^0 / 2)}{3 \sin(20^0 / 2)} = 0,96$$

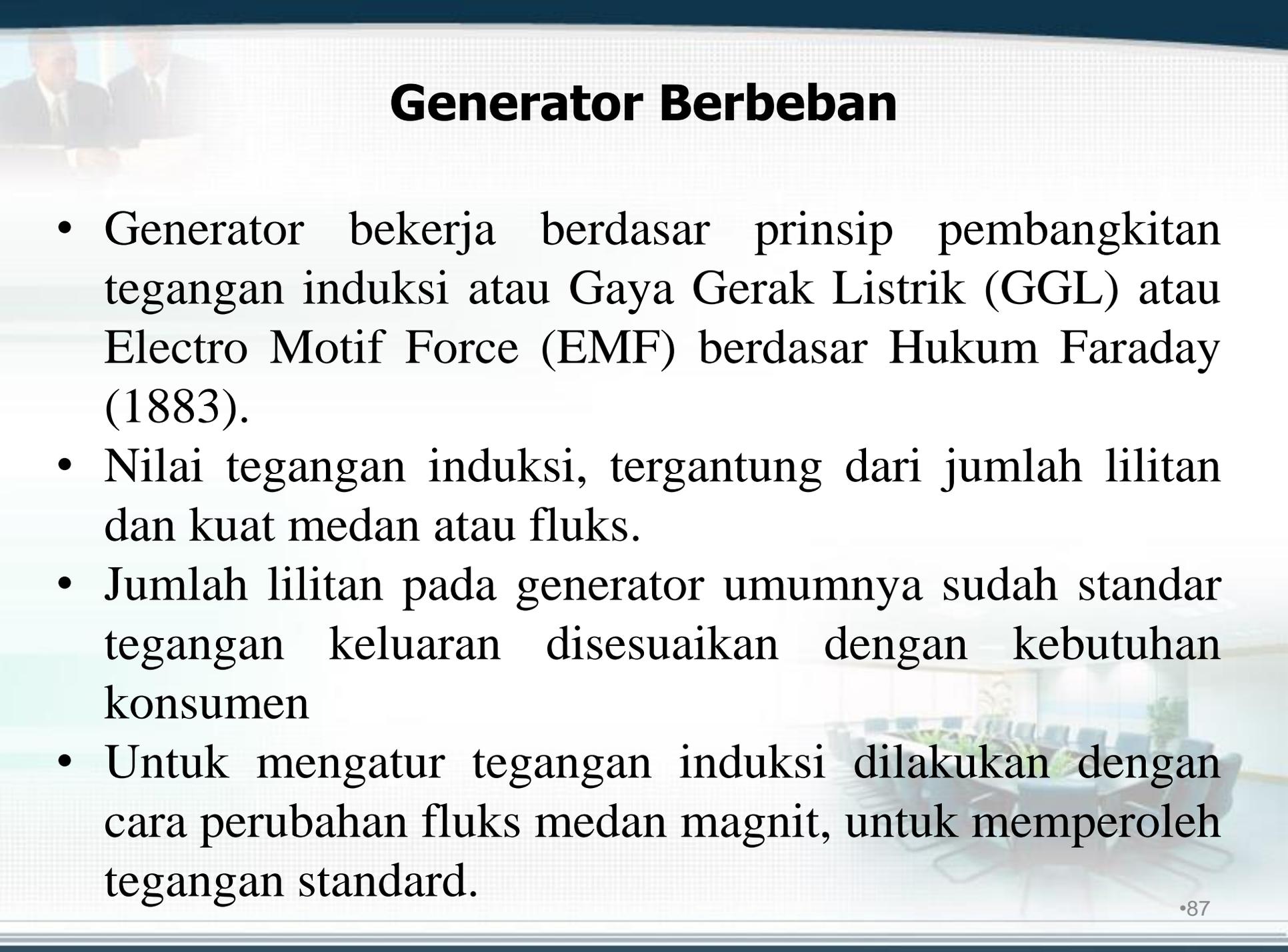
$$T_{\text{perfasa}} = 360 / 2 = 180$$

Kemudian dari persamaan (1.7) diperoleh hasil:

$$\begin{aligned} E_{\text{ph}} &= 4,44 \times 1 \times 0,96 \times 50 \times 0,05 \times 180 \\ &= 1920 \text{ volt / fase} \end{aligned}$$

$$E_{\text{LL}} = \sqrt{3} E_{\text{ph}} = \sqrt{3} \times 1920 = 3320 \text{ volt}$$

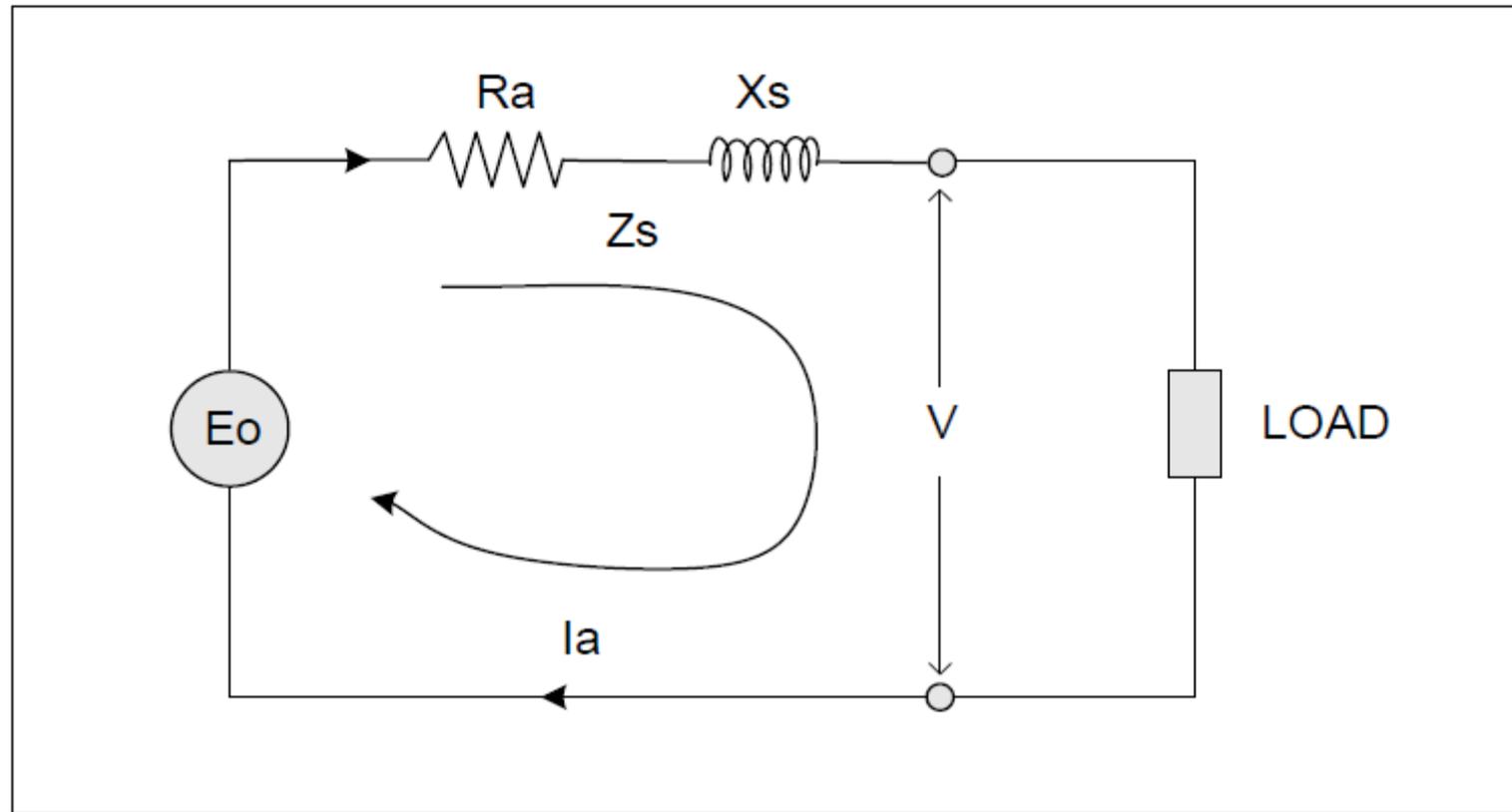




Generator Berbeban

- Generator bekerja berdasar prinsip pembangkitan tegangan induksi atau Gaya Gerak Listrik (GGL) atau Electro Motif Force (EMF) berdasar Hukum Faraday (1883).
- Nilai tegangan induksi, tergantung dari jumlah lilitan dan kuat medan atau fluks.
- Jumlah lilitan pada generator umumnya sudah standar tegangan keluaran disesuaikan dengan kebutuhan konsumen
- Untuk mengatur tegangan induksi dilakukan dengan cara perubahan fluks medan magnet, untuk memperoleh tegangan standard.

Rangkaian Ekuivalen Generator





Rangkaian Ekuivalen Generator

- a. Arus beban (I_a)
- b. Tahanan jangkar (R_a)
- c. Reaktansi bocor (X_L)
- d. Reaktansi akibat reaksi jangkar (X_a)
- e. Reaktansi Sinkron (X_s)
- f. Impedansi Sinkron (Z_s)
- g. Tegangan induksi/GGL (E_o)
- h. Tegangan jala-jala (V)





Arus Jangkar (Arus Beban Ia)

- Arus jangkar atau juga disebut arus beban terjadi karena adanya beban.
- Bila tidak ada beban maka arus jangkar sama dengan nol
- Nilai arus jangkar tergantung dari beban.
- Arus jangkar berperan untuk mencari harga tegangan induksi.
- Tegangan induksi akan sama dengan tegangan terminal saat beban nol (tidak berbeban).



Tahanan Jangkar (R_a)

- Suatu kumpulan jangkar baik yang terletak di rotor maupun di stator yang merupakan gulungan penghantar dan terbuat dari tembaga tentu mempunyai tahanan (Resistansi).
- Nilai tahanan ini tergantung dari, tahanan jenis bahan (Resistivity), panjang penghantar, penampang kawat penghantar dan berpengaruh terhadap suhu.
- Pengukuran praktis biasanya dilakukan saat Generator mati, dengan peralatan "Jembatan Wheatstone" diperoleh nilai tahanan aliran arus searah.
- Pada kondisi kerja arus jangkar yang mengalir berbentuk Sinusoidal dengan frekwensi 50 atau 60 Hz, dengan demikian harga tahanan sesungguhnya adalah 1,6 kali nilai tahanan arus searah atau hasil pengukuran tadi.

Tahanan Jangkar (Ra)

- Tahanan jangkar akan menimbulkan drop tegangan akibat mengalir nya arus jangkar.
- Nilai drop tegangan yang diakibatkan oleh tahanan jangkar tergantung dari hasil perkalian arus jangkar yang sefasa terhadap V.

$$V \text{ drop} = I_a \cdot R_a.$$

Reaktansi Bocor (X_L)

- Reaktansi bocor adalah fluks jangkar yang terbentuk dari aliran arus jangkar yang tidak memotong celah udara antara rotor dan stator.
- Fluks ini disebut fluks bocor, yang akan membentuk ggl reaktansi tandingan akibat adanya induksi sendiri.
- Ggl reaktansi ini mendahului arus jangkar dengan sudut 90° , yang dapat menimbulkan kerugian tegangan.
- Besarnya jatuh tegangan (voltage drop) akibat dari fluks bocor tergantung dari perkalian arus jangkar.

$$V \text{ drop} = I_a, X_L.$$

Reaktansi Jangkar (X_a)

- Reaksi jangkar adalah terbentuknya fluks jangkar yang berinteraksi dengan fluks utama yang selalu berlangsung dengan hasil sesuai dengan sudut daya arus jangkar.
- Besarnya drop tegangan pada reaksi jangkar akan menyebabkan perubahan tegangan terminal.
- Reaktansi ini disebut Reaktansi akibat reaksi jangkar.

$$V_{\text{drop}} = I_a X_a$$

Reaktansi Sinkron (X_s)

Reaktansi Sinkron terdiri atas reaktansi bocor (X_L) dengan reaktansi akibat reaksi jangkar (X_a).

$$X_s = X_L + X_a$$

Untuk mendapatkan besarnya reaktansi sinkron, biasanya dilakukan dengan dua macam percobaan yaitu :

- Percobaan Beban Kosong
- Percobaan Hubung Singkat

Pada hasil kedua percobaan diatas didapat besaran impedansi sinkron (Z_s).

Dengan menggunakan metoda pitagoras maka besaran reaktansi sinkron d

$$X_s = (Z_s^2 - R_a^2)^{1/2}$$

Reaktansi Sinkron (X_s)

Jatuh tegangan pada reaktansi sinkron ini banyak berpengaruh terhadap tegangan terminal generator.

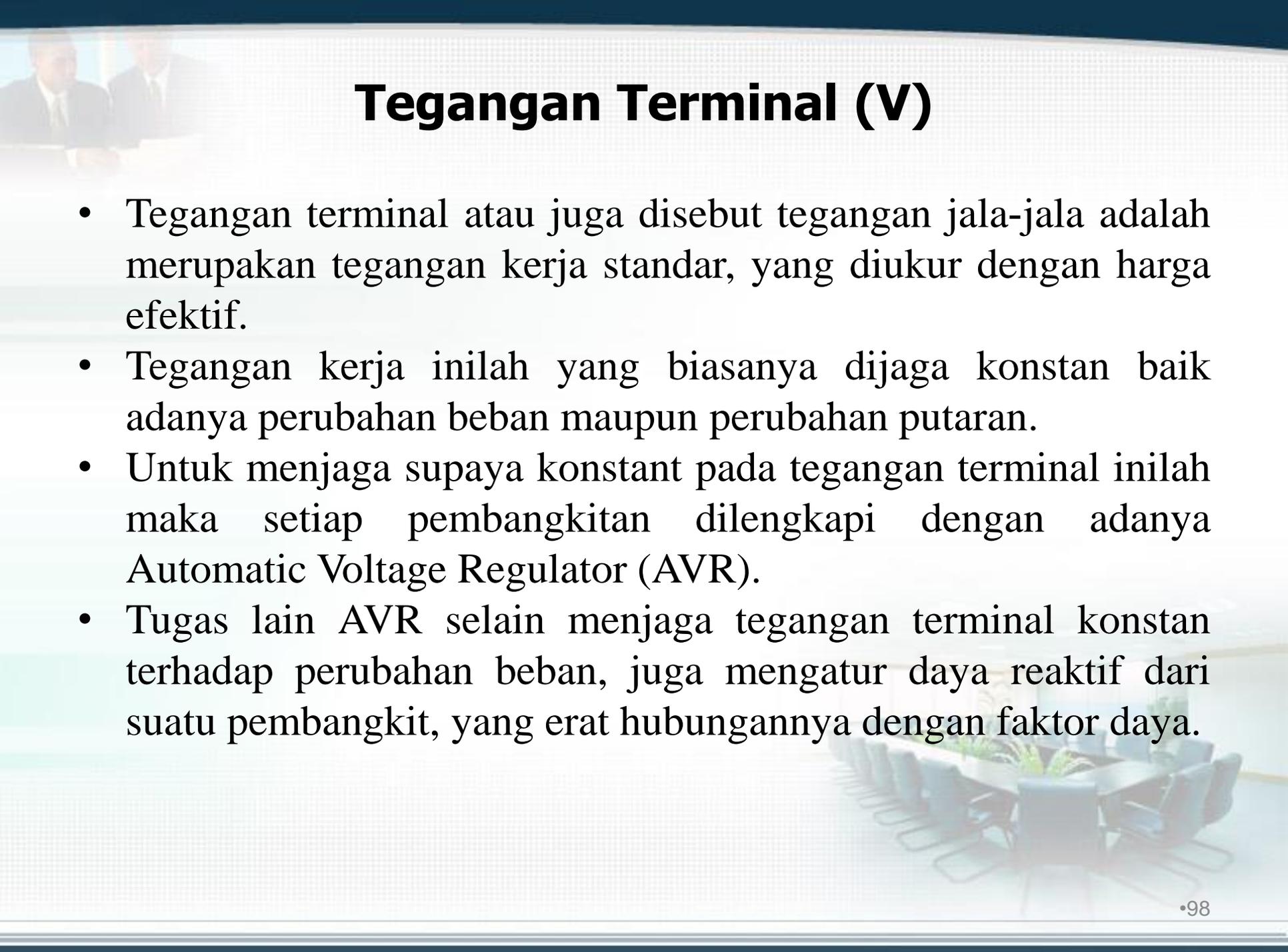
($V_{\text{drop}} = I_a \cdot X_s$).

Tegangan jatuh akibat reaktansi sinkron ini bisa menambah dan juga bisa mengurangi tegangan terminal, tergantung dari sifat arus beban.

$$V_{\text{drop}} = I_a \cdot X_s$$

Tegangan Induksi (E_o)

- Tegangan induksi atau umumnya disebut gaya gerak listrik (GGL) atau Electro Motive Force (EMF), adalah suatu tegangan hasil interaksi induksi dari kumparan medan kekumparan jangkar.
- Besarnya tegangan induksi tergantung dari perubahan fluxi di kumparan medan, tetapi juga tergantung dari besaran arus jangkar.
- Yang artinya bukan berarti bila arus jangkar naik kemudian tegangan induksi ikut naik, tetapi tergantung dari sifat arus beban.



Tegangan Terminal (V)

- Tegangan terminal atau juga disebut tegangan jala-jala adalah merupakan tegangan kerja standar, yang diukur dengan harga efektif.
- Tegangan kerja inilah yang biasanya dijaga konstan baik adanya perubahan beban maupun perubahan putaran.
- Untuk menjaga supaya konstant pada tegangan terminal inilah maka setiap pembangkitan dilengkapi dengan adanya Automatic Voltage Regulator (AVR).
- Tugas lain AVR selain menjaga tegangan terminal konstan terhadap perubahan beban, juga mengatur daya reaktif dari suatu pembangkit, yang erat hubungannya dengan faktor daya.

Tegangan Terminal (V)

- Tegangan induksi tidak dapat diukur langsung, tetapi dapat dihitung melalui percobaan-percobaan pembebanan.
- Tegangan terminal merupakan tegangan kerja yang dikenal selama ini, dan tegangan ini diperoleh dari tegangan induksi (GGL) setelah melewati beberapa kerugian tegangan pada tahanan jangkar dan reaktansi jangkar.
- Secara matematis bahwa tegangan induksi (E_o) akan lebih besar dari pada tegangan terminal (V) sebab, ada kerugian tegangan jatuh pada impedansi sinkron.

$$V = E_o - I_a \cdot Z_s$$

Atau

$$E_o = V + I_a \cdot Z_s$$

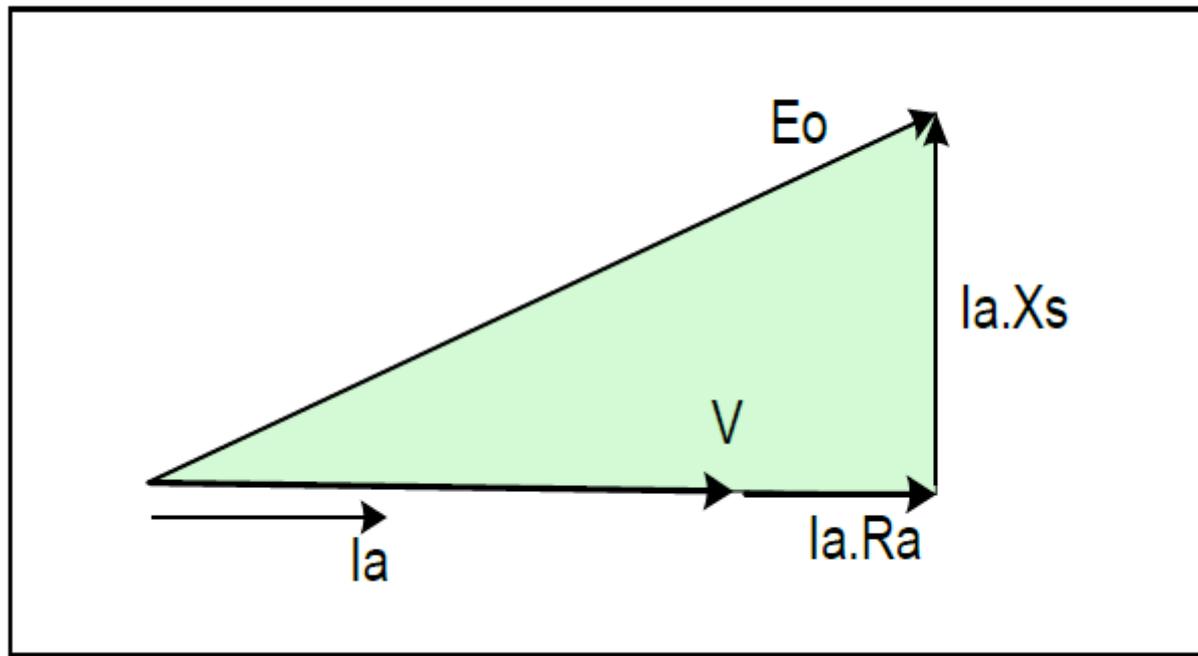
Tegangan Terminal (V)

- Sifat parameter-parameter dan besaran listrik tidak linier karena mempunyai besar dan arah yang disebut dengan istilah vektor.
- Perhitungan nilai parameter listrik seperti tegangan, arus, reaktansi, impedansi, daya dan faktor daya harus menggunakan sistem bilangan kompleks.
- Bilangan kompleks terdiri dari bilangan nyata (Real) dan bilangan khayal (Imaginair) dapat dipecahkan menjadi bentuk persegi (Rectangular) dan bentuk kutub (Polar).
- Gabungan dari kedua bentuk diatas, segala persoalan tentang listrik relatif, dengan mudah dapat dipecahkan.

BEBAN RESISTIVE

Pada beban resistive murni, arus jangkar (I_a) se fasa atau berimpit terhadap tegangan terminal (V) dan mempunyai faktor daya satu (Unity Power Factor).

Gambar : 19. memperlihatkan diagram vektor beban resistip



Beban Resistif

Berdasarkan diagram vektor diatas, dapat dilihat bahwa arus jangkar (I_a) sejajar dengan tegangan terminal (V).

Drop tegangan pada kumparan ($I_a R_a$) juga sejajar dengan V .

Drop tegangan pada reaktansi Sinkron ($I_a X_s$) tegak lurus terhadap V , maka bila ditarik garis diagonal akan membentuk segitiga siku-siku.

Harga tegangan induksi (E_o) dapat dihitung melalui persamaan pitagoras

$$E_o = [(V + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2]^{1/2}$$

Bila dihitung dengan bilangan kompleks, maka

$$E_o = (V + I_a R_a) + j (I_a X_s)$$

Beban Resistif

Hasil dari perhitungan Vektoris diperoleh bahwa tegangan induksi (E_o) lebih besar daripada tegangan terminal (V)

$$E_o > V$$

Dimana :

E_o = ggl yang dibangkitkan

V = tegangan terminal (jala-jala)

I_a = Arus Jangkar (arus beban)

X_s = Reaktansi Sinkron

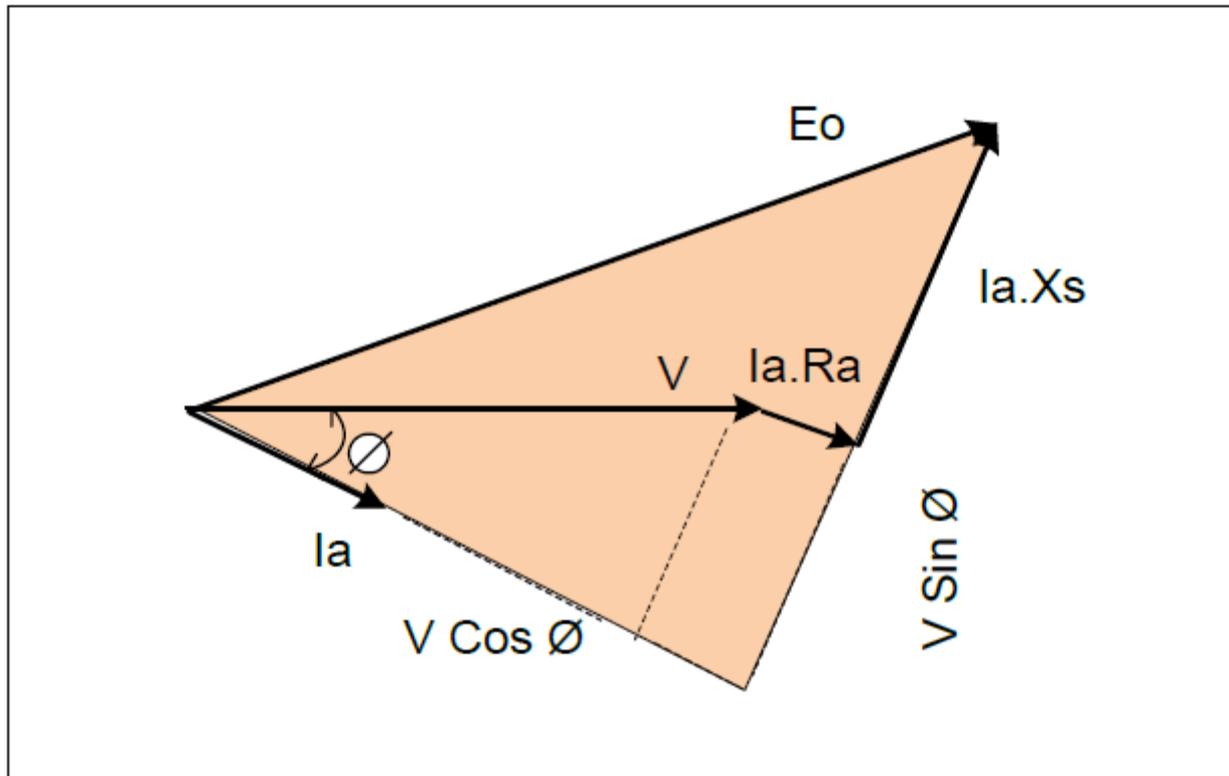
Z_s = Impedansi Sinkron

$I_a \cdot R_a$ = Droop tegangan pada kumparan

$I_a \cdot X_s$ = Drop tegangan pada Reaktansi

BEBAN INDUCTIF

Pada beban inductive, arus jangkar tertinggal terhadap tegangan terminal (V) sebesar sudut \emptyset , dan mempunyai faktor daya lagging (Lagging Power Factor).



Berdasarkan diagram vektor diatas, dapat dilihat bahwa arus jangkar tertinggal terhadap tegangan terminal sebesar sudut \emptyset .

Drop tegangan pada kumparan ($I_a.R_a$) tidak sejajar dengan V , tetapi sejajar dengan arus jangkar (I_a).

Drop tegangan pada Reaktansi Sinkron ($I_a X_s$) tegak lurus terhadap drop tegangan pada kumparan, bukan pada V .

Oleh sebab itu untuk menghitung ggl terinduksi harus dengan bantuan ilmu ukur sudut (Trigoneometris), kemudian dilanjutkan

$$E_o = [(V \cos \emptyset + I_a.R_a)^2 + (V \sin \emptyset + I_a.X_s)^2]^{1/2}$$

Bila dihitung dengan metode bilangan kompleks. Maka :

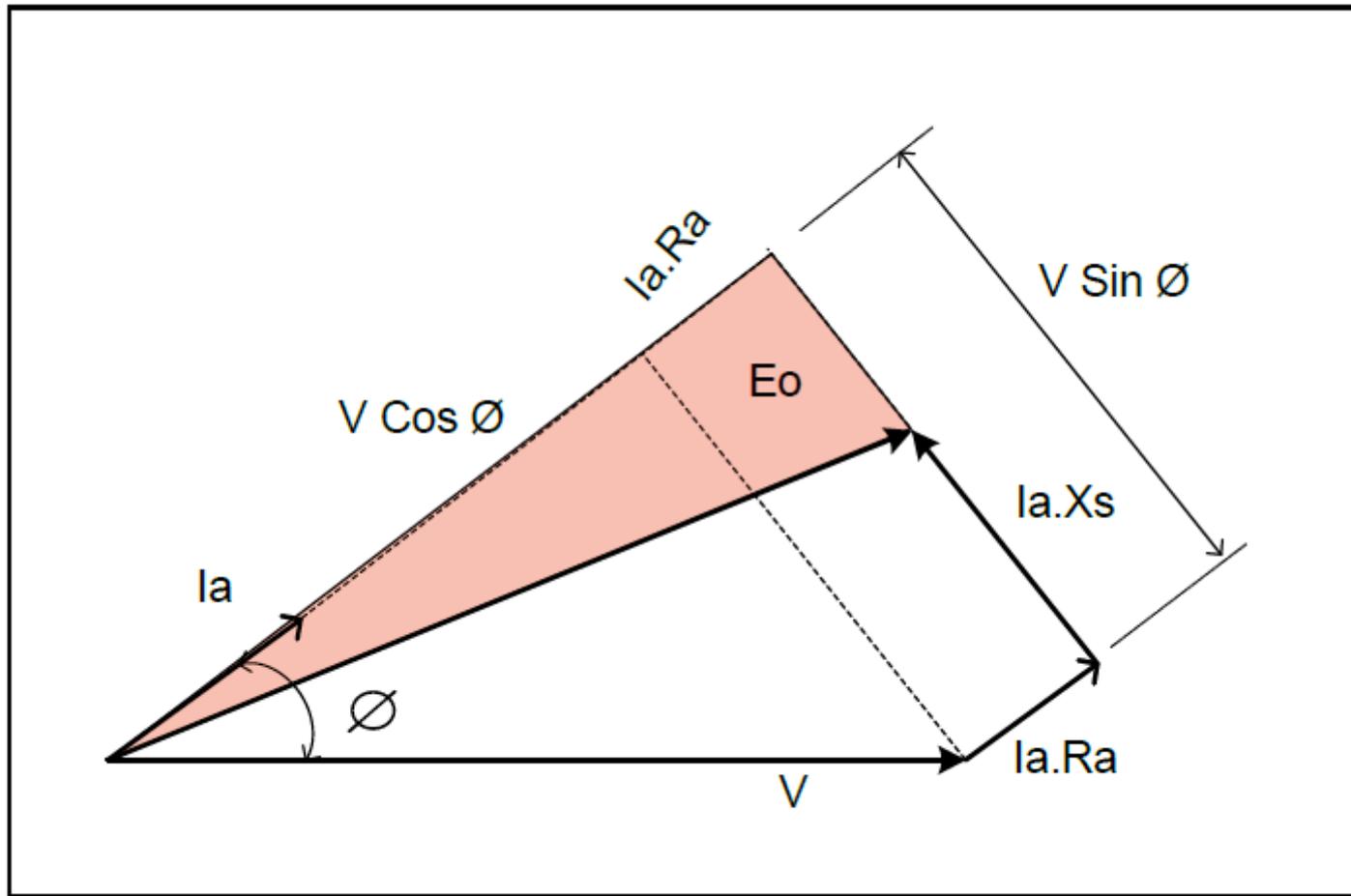
$$E_o = (V \cos \emptyset + I_a.R_a) + j (V \sin \emptyset + I_a.X_s)$$

Hasil dari perhitungan vektoris diperoleh bahwa tegangan induksi jauh lebih besar daripada tegangan terminal ($E_o > V$).

BEBAN KAPASITIF

Pada beban kapasitive, arus jangkar (I_a) mendahului terhadap tegangan terminal (V) sebesar sudut ϕ , dan mempunyai faktor daya leading (Leading Power Factor).





Gambar : 21. Memperlihatkan diagram vektor beban kapasitiv

Beban Kapasitif

- Berdasarkan diagram vektor diatas, dapat dijelaskan bahwa arus jangkar mendahului terhadap tegangan terminal sebesar sudut ϕ .
- Drop tegangan pada kumparan ($I_a.R_a$) tidak sejajar terhadap V , tetapi sejajar dengan arus jangkar (I_a).
- Drop tegangan pada Reaktansi Sinkron ($I_a.X_s$) tegak lurus terhadap drop tegangan pada kumparan, bukan pada V .
- Dari diagram vektor baik beban Resistive, induktip maupun kapasitif, semua aturan perhitungan untuk mencari tegangan induksi adalah sama, yang membedakan adalah arah arus beban.
- Dengan demikian hasil tegangan induksi (E_o) bisa saja terjadi lebih kecil dari pada tegangan terminal (V).

Beban Kapasitif

Ggl terinduksi dapat dihitung dengan bantuan ilmu ukur sudut (goneometris) kemudian dilanjutkan dengan metode pitagoras.

$$E_o = [(V \cos \emptyset + I_a \cdot R_a)^2 + (V \sin \emptyset - I_a \cdot X_s)^2]^{1/2}$$

Bila dihitung dengan metode bilangan kompleks, maka :

$$E_o = (V \cos \emptyset + I_a \cdot R_a) + j (V \sin \emptyset - I_a \cdot X_s)$$

Beban Kapasitif

- Metode pengaturan tegangan dari ketiga percobaan pembebanan diatas dapat disimpulkan bahwa besaran tegangan induksi (E_o) tidak sama terhadap setiap pembebanan dengan referensi tegangan terminal (V) konstant.
- Atau besaran tegangan terminal (V) akan selalu berubah pada berbagai pembebanan yang berbeda pada referensi tegangan induksi (E_o) konstant.
- Dengan memperhatikan perubahan tegangan induksi (E_o) untuk faktor kerja yang berbeda-beda, karakteristik tegangan terminal (V) terhadap arus jangkar (I_a) dapat digambarkan sebagai berikut.
- Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan induksi Alternator (E_o) antara keadaan beban kosong dengan beban penuh, atau umumnya disebut Regulasi tegangan (Zukan DTL. Hal 57).
- Regulasi tegangan dinyatakan persentase antara tegangan jatuh pada impedansi sinkron dibagi dengan terminal.

Beban Kapasitif

Regulasi tegangan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Regulasi} = \frac{E_o - V}{V} \times 100 \%$$

Dimana :

E_o : Tegangan induksi

V : Tegangan terminal

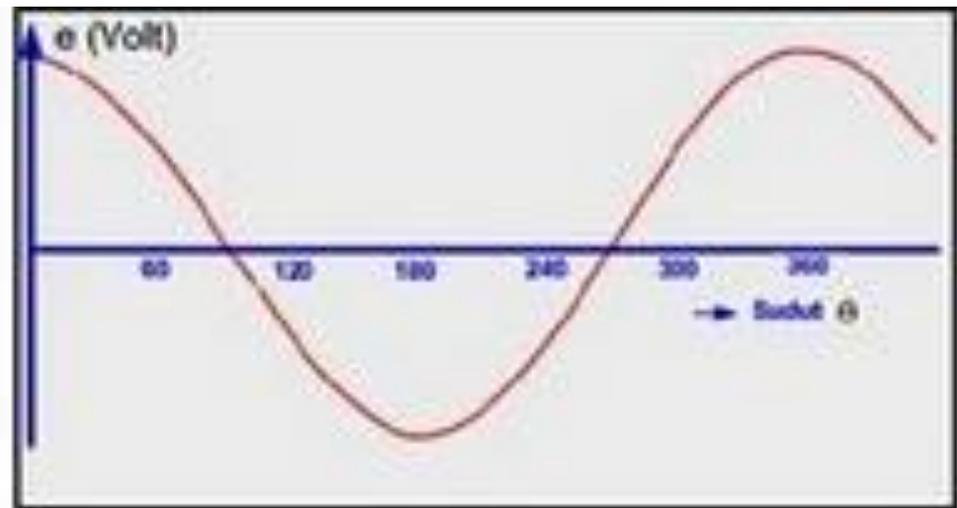
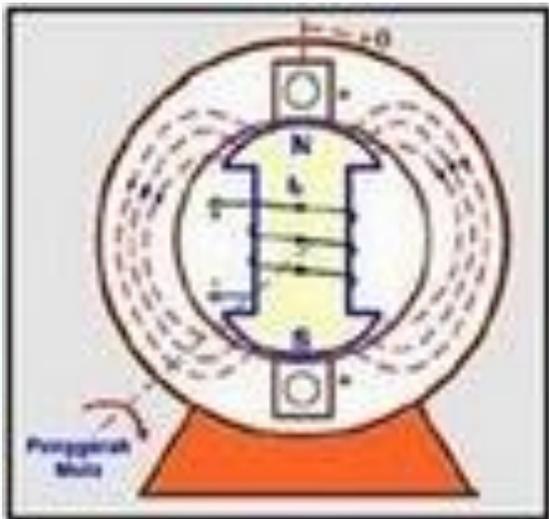
$E_o - V$: Merupakan jatuh tegangan pada impedansi sinkron (Z_s).

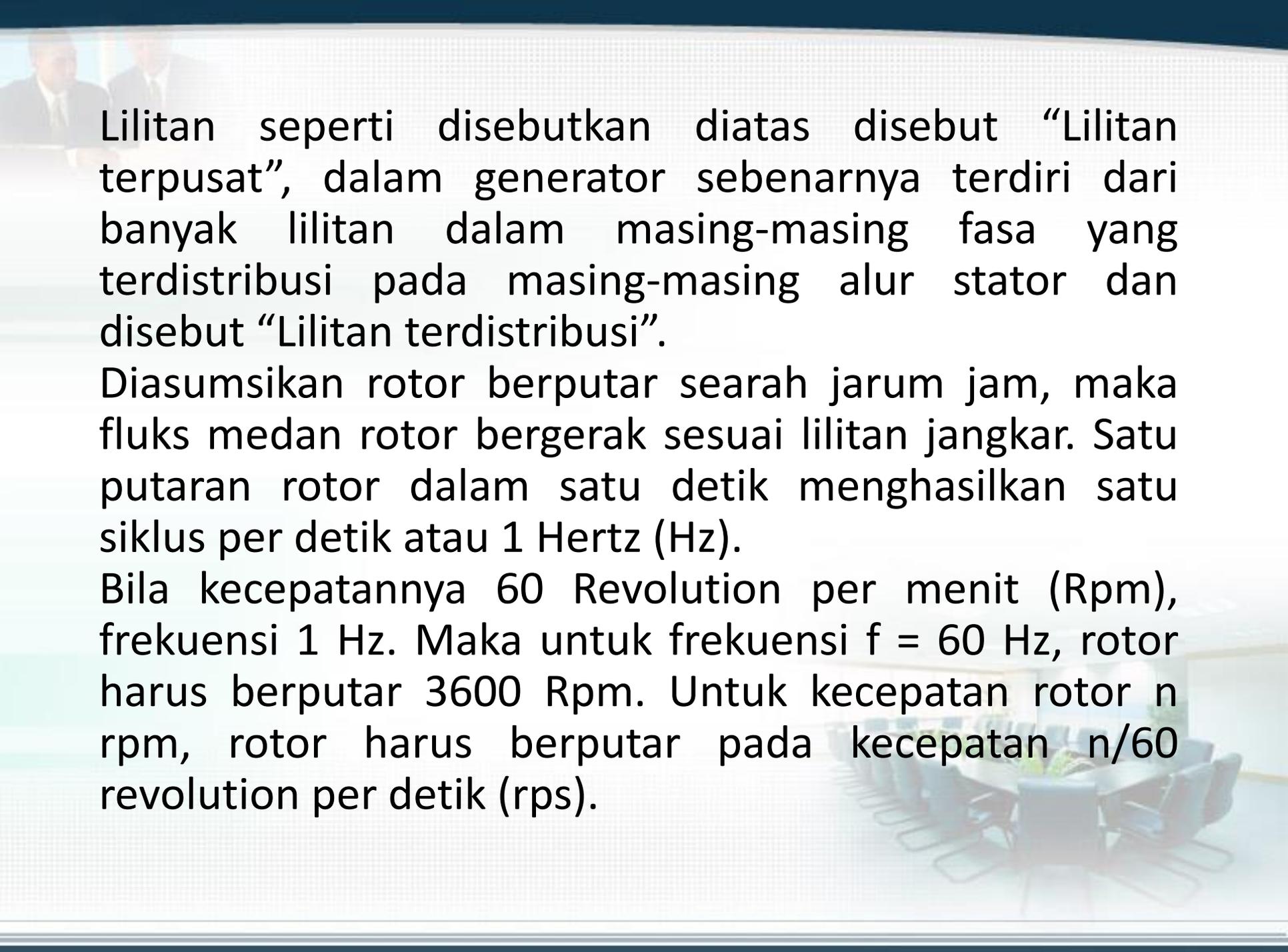
Contoh Perhitungan Generator

- Suatu Generator satu fasa 200 KVA, 2000 V, 50 Hz, 750 RPM. Tahanan jangkar diukur dengan jembatan wheatstone sebesar 0,5 ohm.
- Test hubung singkat dengan arus penguatan 2,5 Amper.
- Menghasilkan arus beban penuh sebesar 100 Amper.
- Test beban kosong dengan arus penguatan yang sama menghasilkan tegangan (V_o) = 500 Volt.
- Tahanan jangkar diukur dengan jembatan weastone sebesar 0,5 ohm, berarti sama dengan $0,5 \times 1,6 = 0,8$ ohm.
- Impedasi sinkron dapat dicari dari hasil percobaan hubung singkat dan percobaan beban kosong.

Prinsip Kerja Generator sinkron

Gambar ini akan memperlihatkan prinsip kerja dari sebuah generator AC dengan dua kutub, dan dimisalkan hanya memiliki satu lilitan yang terbuat dari dua penghantar secara seri, yaitu penghantar a dan a'.

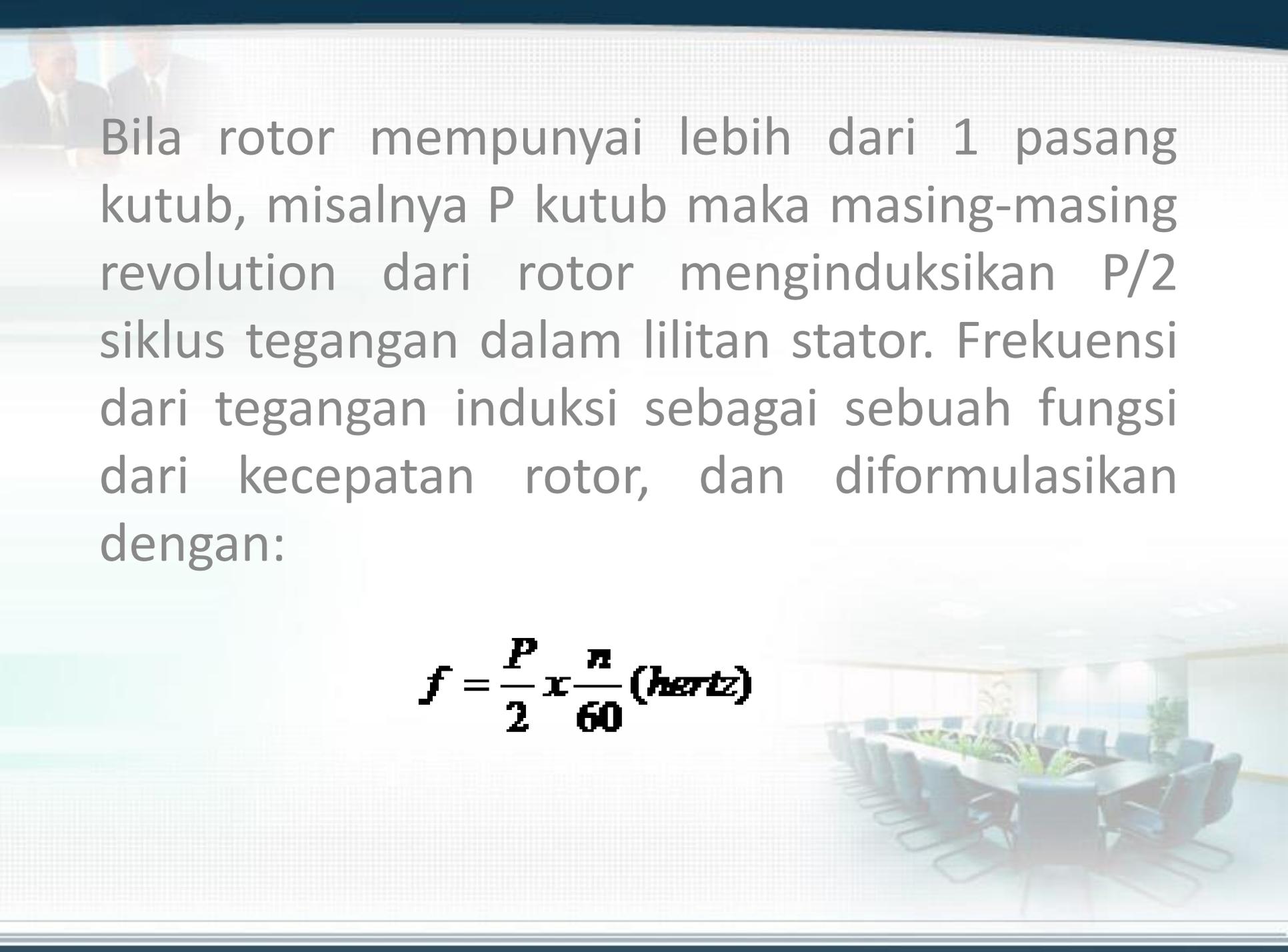




Lilitan seperti disebutkan diatas disebut “Lilitan terpusat”, dalam generator sebenarnya terdiri dari banyak lilitan dalam masing-masing fasa yang terdistribusi pada masing-masing alur stator dan disebut “Lilitan terdistribusi”.

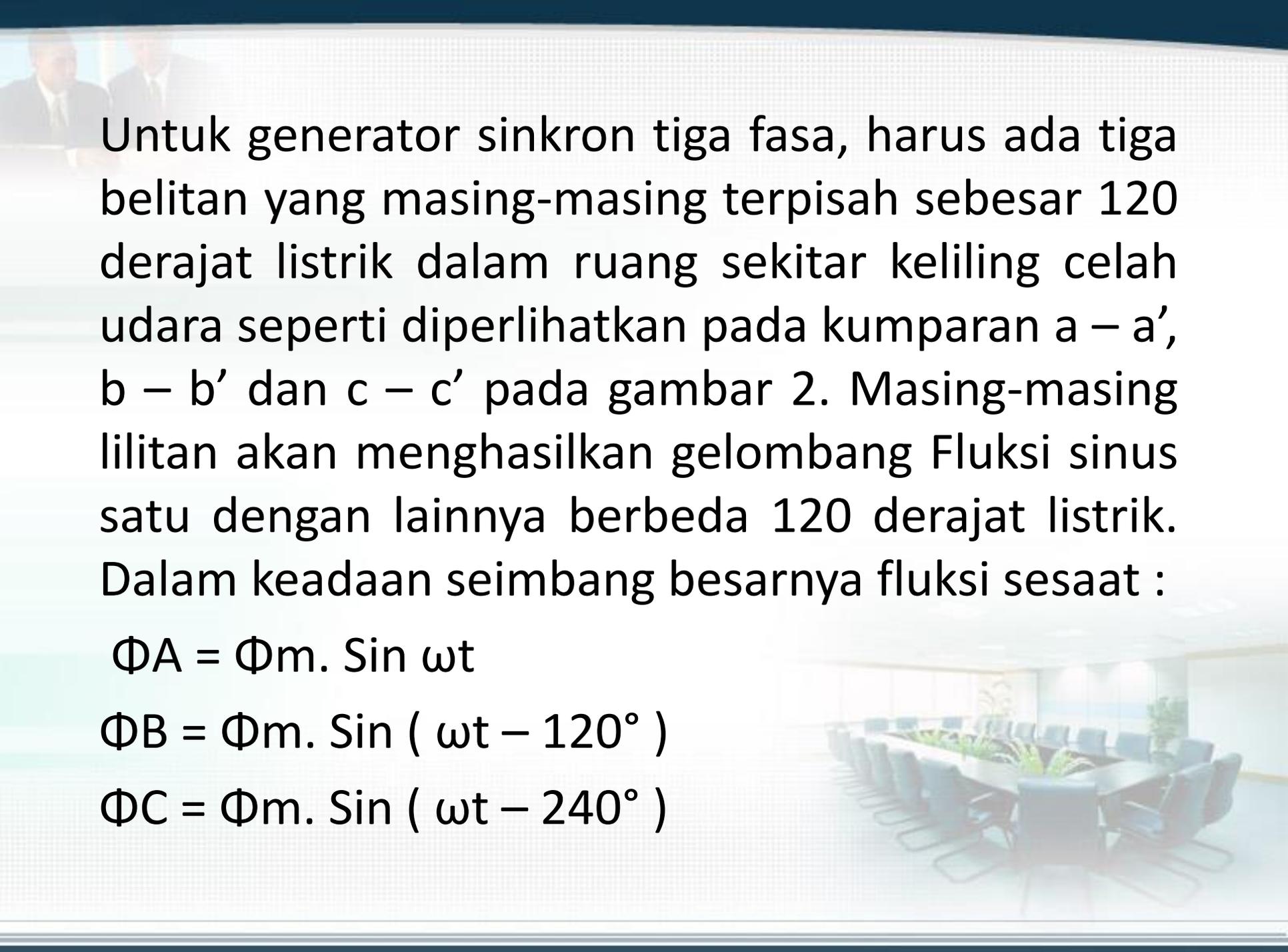
Diasumsikan rotor berputar searah jarum jam, maka fluks medan rotor bergerak sesuai lilitan jangkar. Satu putaran rotor dalam satu detik menghasilkan satu siklus per detik atau 1 Hertz (Hz).

Bila kecepatannya 60 Revolution per menit (Rpm), frekuensi 1 Hz. Maka untuk frekuensi $f = 60$ Hz, rotor harus berputar 3600 Rpm. Untuk kecepatan rotor n rpm, rotor harus berputar pada kecepatan $n/60$ revolution per detik (rps).



Bila rotor mempunyai lebih dari 1 pasang kutub, misalnya P kutub maka masing-masing revolution dari rotor menginduksikan P/2 siklus tegangan dalam lilitan stator. Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor, dan diformulasikan dengan:

$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60} \text{ (hertz)}$$

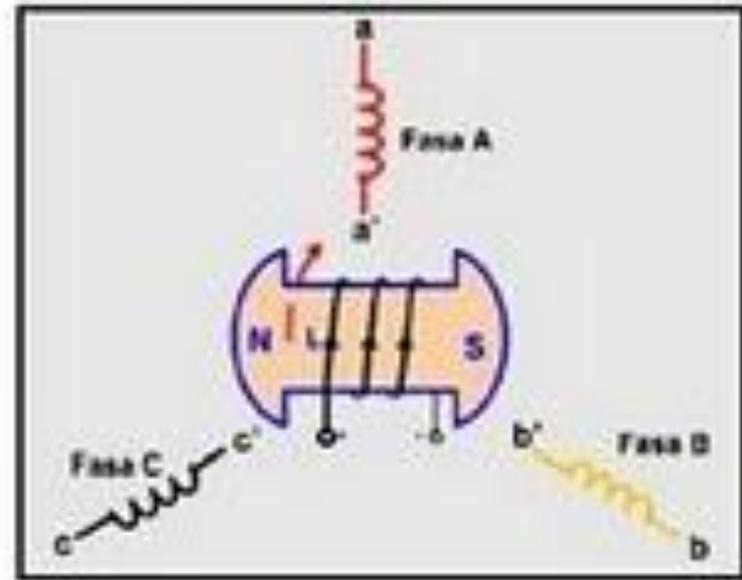
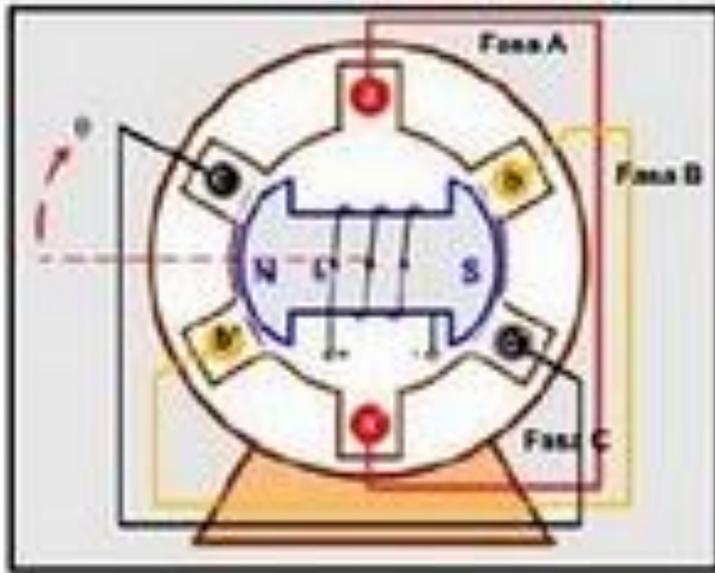


Untuk generator sinkron tiga fasa, harus ada tiga belitan yang masing-masing terpisah sebesar 120 derajat listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti diperlihatkan pada kumparan a – a', b – b' dan c – c' pada gambar 2. Masing-masing lilitan akan menghasilkan gelombang Fluksi sinus satu dengan lainnya berbeda 120 derajat listrik. Dalam keadaan seimbang besarnya fluksi sesaat :

$$\Phi_A = \Phi_m \cdot \sin \omega t$$

$$\Phi_B = \Phi_m \cdot \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$\Phi_C = \Phi_m \cdot \sin (\omega t - 240^\circ)$$



Besarnya tegangan masing-masing fasa adalah :

$$E_{\text{maks}} = B_m \cdot \ell \cdot \omega \cdot r \quad \text{Volt}$$

dimana :

B_m = Kerapatan Fluks maksimum (Tesla)

ℓ = Panjang masing-masing lilitan

ω = Kecepatan sudut dari rotor (rad/s)

r = adius dari jangkar (meter)

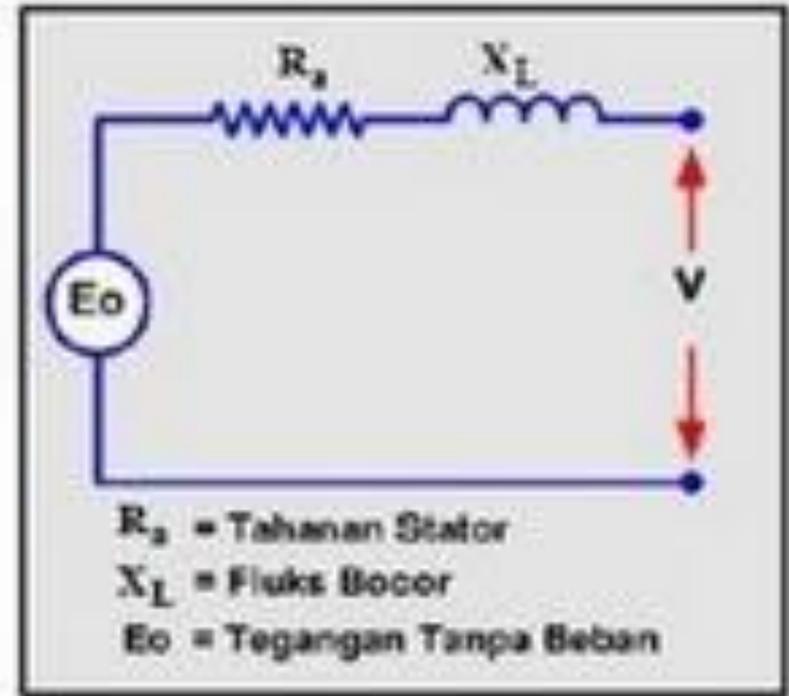
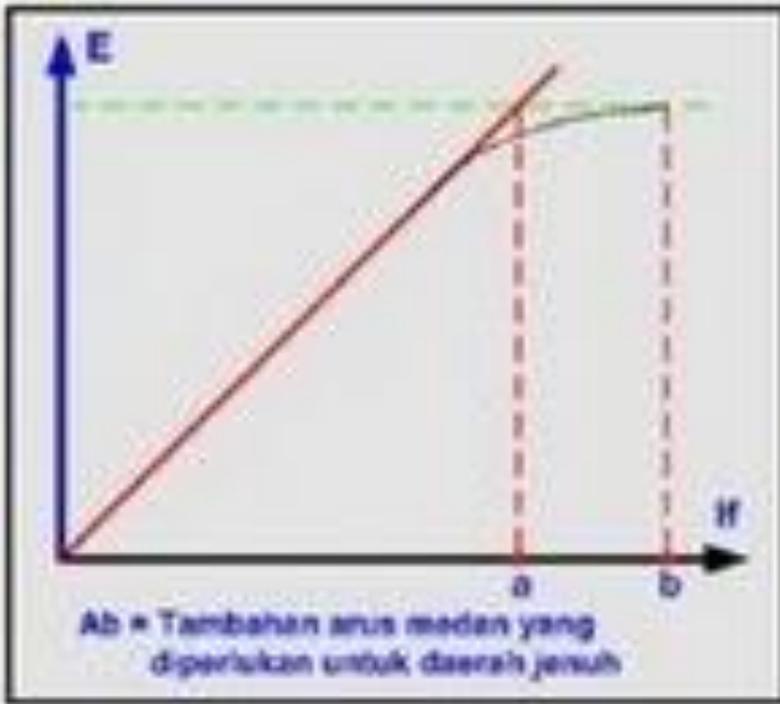


Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator 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 sebesar:

$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi_m \cdot \text{ Volt}$$

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan keluaran juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh), seperti diperlihatkan pada gambar 3



Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban



Generator Berbeban

Bila generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

Resistansi jangkar R_a

Reaktansi bocor jangkar X_l

Reaksi Jangkar X_a

a. Resistansi Jangkar

Resistansi jangkar/fasa R_a menyebabkan terjadinya kerugian tegang/fasa (tegangan jatuh/fasa) dan $I.R_a$ yang sefasa dengan arus jangkar.

b. Reaktansi Bocor Jangkar

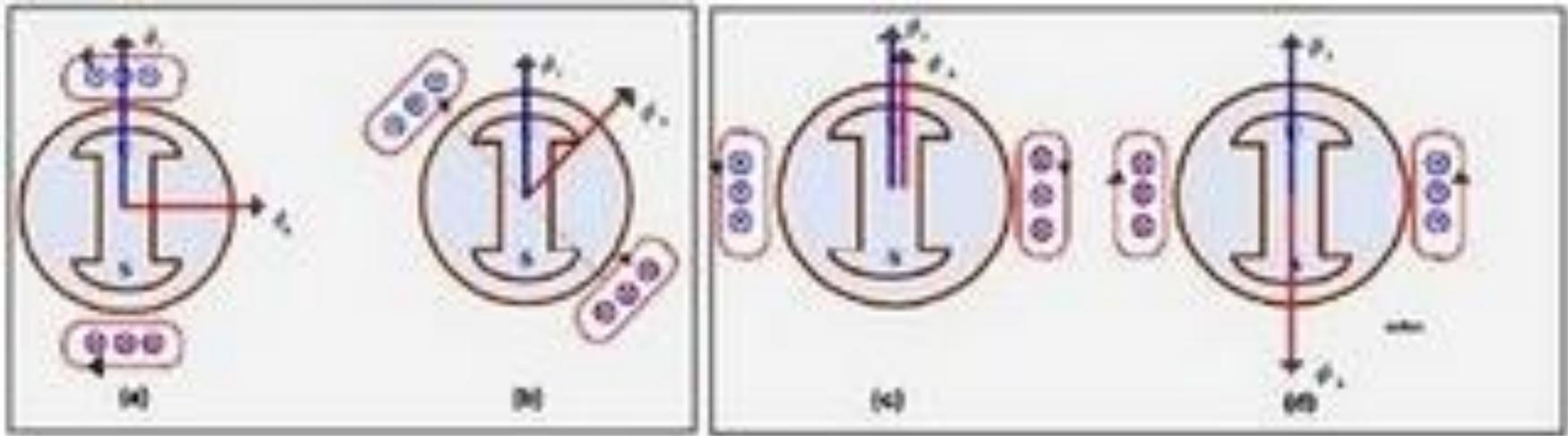
Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut Fluks Bocor.

c. Reaksi Jangkar

Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluksi jangkar (Φ_A) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor (Φ_F), sehingga akan dihasilkan suatu fluksi resultan sebesar :

$$\bar{\Phi}_R = \bar{\Phi}_F + \bar{\Phi}_A$$

Interaksi antara kedua fluksi ini disebut sebagai reaksi jangkar, seperti diperlihatkan pada Gambar 4. yang mengilustrasikan kondisi reaksi jangkar untuk jenis beban yang berbeda-beda.



Kondisi Reaksi Jangkar.



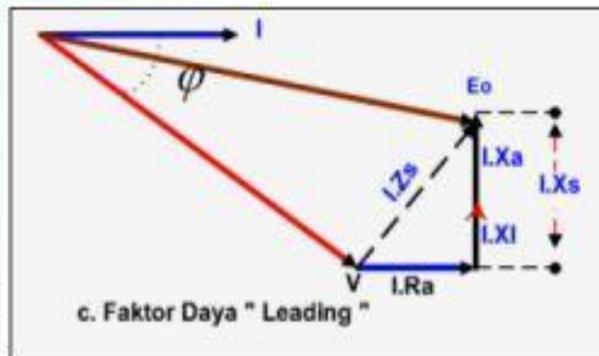
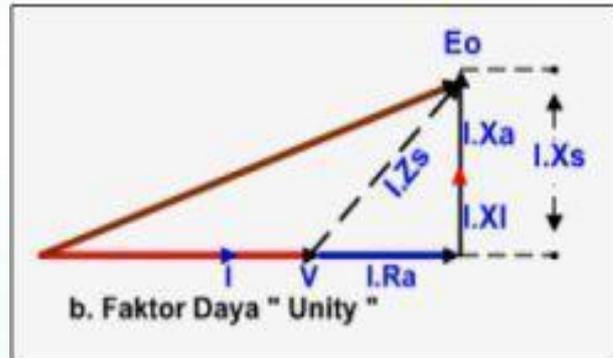
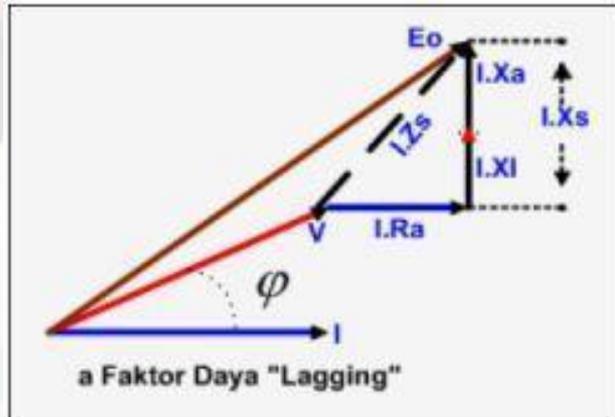
Gambar a, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani tahanan (resistif) sehingga arus jangkar I_a sefasa dengan GGL E_b dan Φ_A akan tegak lurus terhadap Φ_F .

Gambar b, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani kapasitif, sehingga arus jangkar I_a mendahului ggl E_b sebesar θ dan Φ_A terbelakang terhadap Φ_F dengan sudut $(90-\theta)$.

Gambar c, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat dibebani kapasitif murni yang mengakibatkan arus jangkar I_a mendahului GGL E_b sebesar 90° dan Φ_A akan memperkuat Φ_F yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

Gambar d, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat arus diberi beban induktif murni sehingga mengakibatkan arus jangkar I_a terbelakang dari GGL E_b sebesar 90° dan Φ_A akan memperlemah Φ_F yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

Jumlah dari reaktansi bocor X_L dan reaktansi jangkar X_a biasa disebut reaktansi Sinkron X_s .



Vektor diagram untuk beban yang bersifat Induktif, resistif murni, dan kapasitif diperlihatkan pada Gambar a, b dan c.

Total Tegangan Jatuh :

$$= I.Ra + j (I.Xa + I.XL)$$

$$= I \{Ra + j (Xs + XL)\}$$

$$= I \{Ra + j (Xs)\}$$

$$= I.Zs$$

Menentukan Resistansi dan Reaktansi

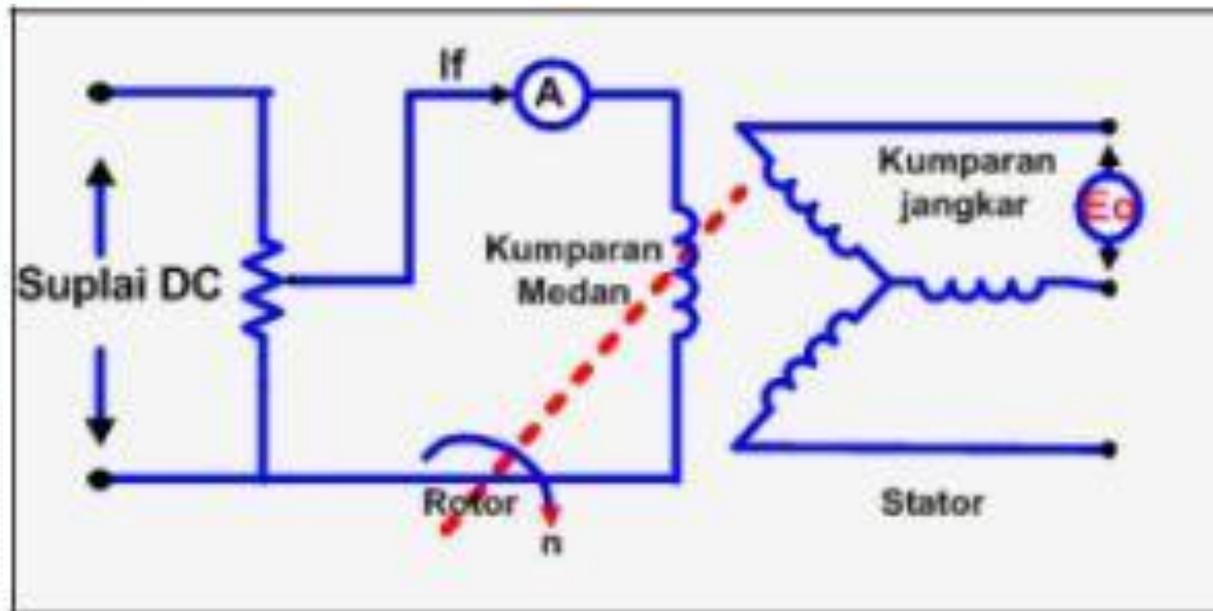
Untuk bisa menentukan nilai reaktansi dan impedansi dari sebuah generator, harus dilakukan percobaan (test). Ada tiga jenis test yang biasa dilakukan, yaitu:

1. Test Tanpa beban (Beban Nol)
2. Test Hubung Singkat.
3. Test Resistansi Jangkar.



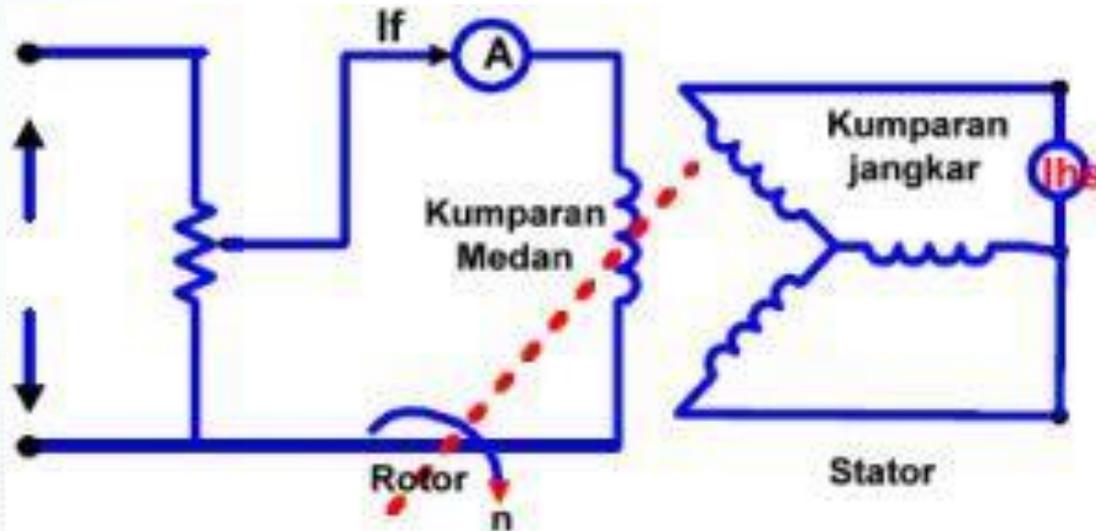
Test Tanpa Beban

Test Tanpa Beban dilakukan pada kecepatan Sinkron dengan rangkaian jangkar terbuka (tanpa beban) seperti diperlihatkan pada Gambar 6. Percobaan dilakukan dengan cara mengatur arus medan (I_f) dari nol sampai rating tegangan output terminal tercapai.

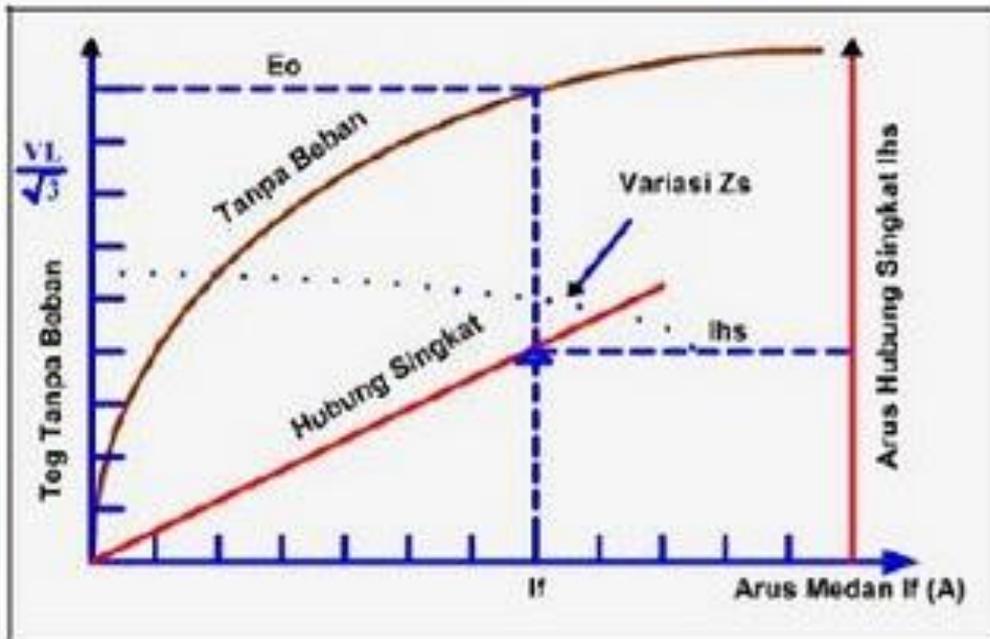


Test Hubung Singkat

Untuk melakukan test ini terminal generator dihubung singkat, dan dengan Ampermeter diletakkan diantara dua penghantar yang dihubung singkat tersebut (Gambar 7). Arus medan dinaikkan secara bertahap sampai diperoleh arus jangkar maksimum. Selama proses test arus I_f dan arus hubung singkat I_{hs} dicatat.



Dari hasil kedua test diatas, maka dapat digambar dalam bentuk kurva karakteristik seperti diperlihatkan pada gambar berikut



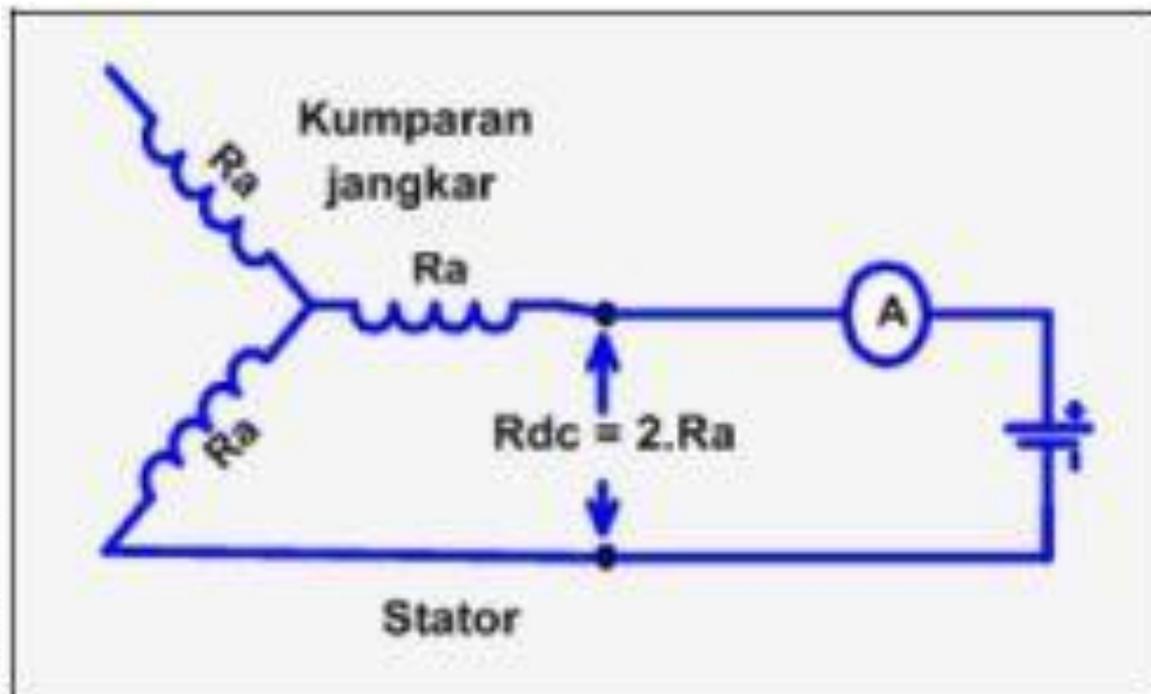
Impedansi Sinkron dicari berdasarkan hasil test, adalah:

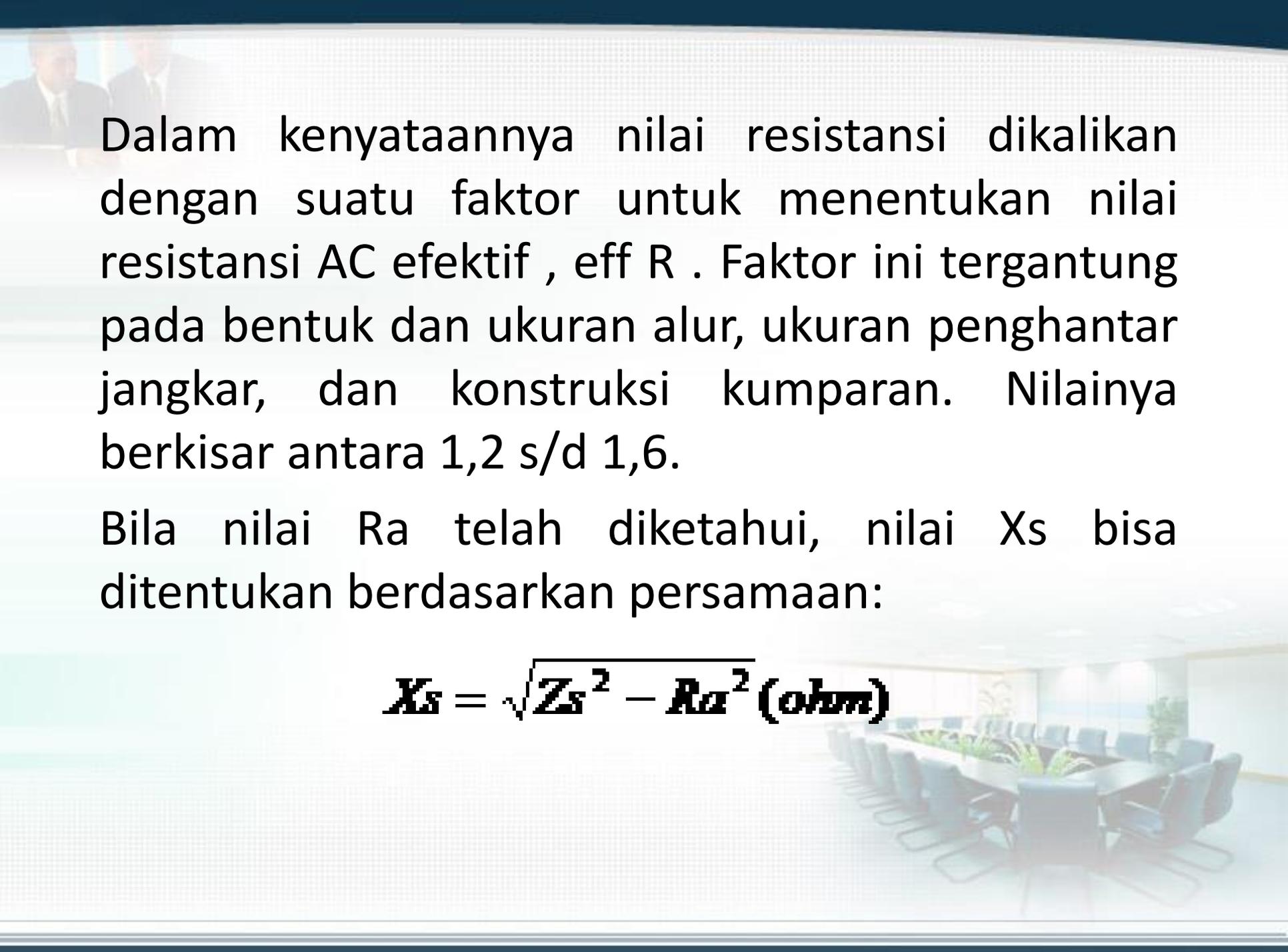
$$Z_s = \frac{E_o}{I_{hs}} \text{ (ohm)}$$

I_f = konstant

Test Resistansi Jangkar

Dengan rangkaian medan terbuka, resistansi DC diukur antara dua terminal output sehingga dua fasa terhubung secara seri, Gambar 9. Resistansi per fasa adalah setengahnya dari yang diukur.

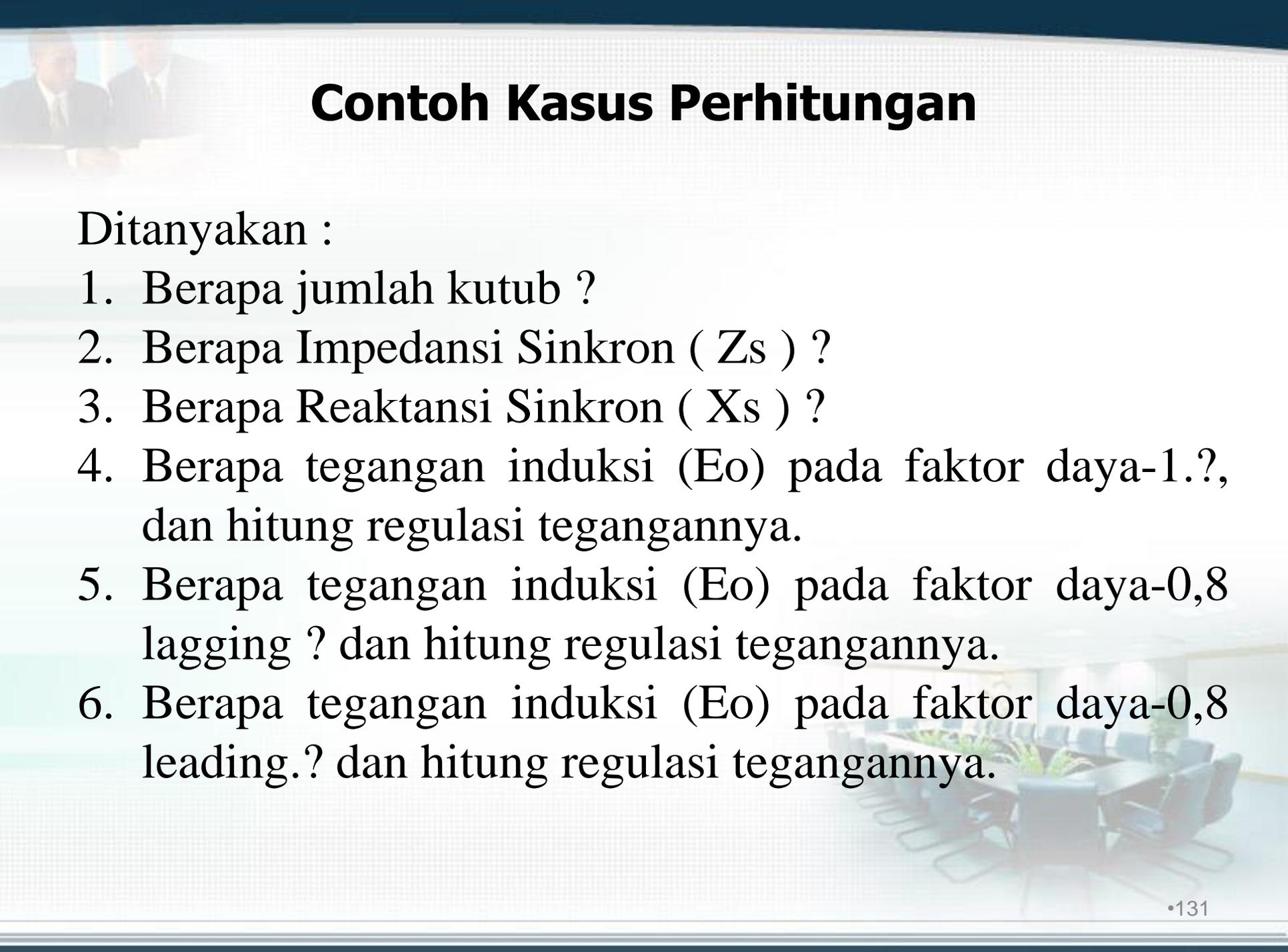




Dalam kenyataannya nilai resistansi dikalikan dengan suatu faktor untuk menentukan nilai resistansi AC efektif , $eff R$. Faktor ini tergantung pada bentuk dan ukuran alur, ukuran penghantar jangkar, dan konstruksi kumparan. Nilainya berkisar antara 1,2 s/d 1,6.

Bila nilai R_a telah diketahui, nilai X_s bisa ditentukan berdasarkan persamaan:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} \text{ (ohm)}$$



Contoh Kasus Perhitungan

Ditanyakan :

1. Berapa jumlah kutub ?
2. Berapa Impedansi Sinkron (Z_s) ?
3. Berapa Reaktansi Sinkron (X_s) ?
4. Berapa tegangan induksi (E_o) pada faktor daya-1.?, dan hitung regulasi tegangannya.
5. Berapa tegangan induksi (E_o) pada faktor daya-0,8 lagging ? dan hitung regulasi tegangannya.
6. Berapa tegangan induksi (E_o) pada faktor daya-0,8 leading.? dan hitung regulasi tegangannya.

Jawaban :

a. Mencari jumlah kutub :

$$P = \frac{F \cdot 60}{N} = \frac{50 \times 60}{750} = 4 \text{ pasang kutub} = 8 \text{ kutub}$$

b. Mencari Impedansi sinkron (Z_s)

$$Z_s = \frac{V_o}{I_{cs}} = \frac{500V}{100A} = 5 \Omega$$

c. Mencari Reaktansi sinkron (X_s)

$$Z_s = (X_s^2 + R_a^2)^{1/2}$$

$$X_s = (Z_s^2 - R_a^2)^{1/2} = (5^2 - 0.8^2)^{1/2} = 4,936 \Omega$$

Drop tegangan pada kumparan = ($I_a \cdot R_a$) = 100 x 0,8 = 80 Volt.

Drop tegangan pada Reaktansi = ($I_a \cdot X_s$) = 100 x 4,936 = 493,6 Volt

d. Mencari tegangan induksi E_o pada Faktor daya 1

$$\begin{aligned} E_o &= [(V + I_a.R_a)^2 + (I_a.X_s)^2]^{1/2} \\ &= [(2000 + 80)^2 + (493,6)^2]^{1/2} = 2140 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Regulasi tegangan pada Faktor daya 1

$$\begin{aligned} \text{Regulasi (PF=1)} &= \frac{E_o - V}{V} \times 100\% \\ &= \frac{2140 - 2000}{2000} \times 100\% = 7\% \end{aligned}$$

e. Mencari tegangan induksi E_o pada Faktor daya = 0,8 lag.

$$\cos \emptyset = 0,8, \quad \emptyset = 36,87^\circ, \quad \sin \emptyset = 0,6$$

$$\begin{aligned} E_o &= [(V \cos \emptyset + I_a.R_a)^2 + (V \sin \emptyset + I_a.X_s)^2]^{1/2} \\ &= [(2000 \cdot 0,8 + 80)^2 + (2000 \cdot 0,6 + 493,6)^2]^{1/2} = 2385 \text{ Volts.} \end{aligned}$$

Regulasi tegangan untuk faktor daya = 0,8 lagging

$$\text{Regulasi (PF=0.8 lag)} = \frac{E_o - V}{V} \times 100\% = \frac{2385 - 2000}{2000} \times 100\% = 19\%$$

Disini didapat bahwa tegangan terminal (V) jauh lebih kecil dibandingkan tegangan induksi (E_o), atau bila V merupakan tegangan konstant maka diperlukan tegangan induksi yang lebih besar pada faktor daya beban lagging.

f. Mencari tegangan induksi E_o pada Faktor daya = 0,8 leading

$$\begin{aligned} E_o &= [(V \cos \theta + I_a R_a)^2 + (C \sin \theta - I_a X_s)^2]^{1/2} \\ &= [(2000 \cdot 0,8 + 80)^2 + (2000 \cdot 0,6 - 493,6)^2]^{1/2} = 1822 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Regulasi tegangan untuk faktor daya 0.8 leading

$$\text{Regulasi (PF: 0.8 Lead)} = \frac{E_o - V}{V} \times 100\% = \frac{1822 - 2000}{2000} \times 100\% = -9\%$$

Contoh Kasus

- Disini didapat bahwa tegangan terminal (V) lebih besar dari pada tegangan induksi E_o .
- Atau bila V merupakan tegangan terminal konstan, maka tegangan induksi lebih kecil dari pada tegangan terminal.
- Mengapa hal ini bisa terjadi ?
- Dalam operasi Generator, hal ini yang umumnya disebut dengan penguatan kurang atau Under Excitation.
- Timbulnya Under Excitation karena Generator menerima daya reaktif dari bus-bar, atau tegangan bus-bar lebih besar dari pada tegangan terminal generator.
- Oleh sebab itu didalam mengoperasikan beberapa unit generator, power faktor dari masing - masing generator dijaga sedemikian rupa antara 0,6 - 0,9 lagging, supaya tidak terjadi penguatan kurang atau Under Excitation.

Kurva Kemampuan Generator

Power factor is defined as the difference, expressed as a percentage, between the voltage and current sine waves. It is critical to understand the generator does not produce power factor – the load does. Therefore, the generator set must be able to react to power factor in the load.

Leading or Lagging Power Factor?

- Power factor can be leading or lagging, or in some cases, at unity.
- A leading power factor can be caused by capacitor-intensive loads, a lightly loaded synchronous motor or an induction motor that is being driven by its load.
- Lagging power factor is caused mainly by induction motors.
- Unity power factor can be found in loads dominated by electronic devices or resistance loads such as lights and heaters.
- Average industrial loads include many motors, so the recognized standard is 0.8 lagging power factor. Leading power factor is practically unattainable with today's loads.

The key here is to keep in mind PF will affect the genset's overall output capability.

Assuming the same current output, both following statements could result:

1. Any PF in excess of rated (greater than 0.8), the genset output is limited by engine horsepower.
2. Any PF less than rated (0.8) output is limited by generator amperage.

Kurva Kemampuan Generator

LAGGING LOAD POWER FACTOR & ALTERNATOR KVA

Lagging power factor <0.8 : lagging power factor below 0.8 results in the heating of the rotor winding at 100% of alternator kVA output

LEADING LOAD POWER FACTOR & ALTERNATOR KVA

Leading power factor : leading power factor results in alternator stator end iron heating and the alternator automatic voltage control system becoming unstable

LAGGING LOAD POWER FACTOR & ENGINE KW

Lagging power factor >0.8 : lagging power factor above 0.8 results in the engine not having sufficient kW to power the alternator to 100% of its kVA rating

Lagging power factor <0.8 : lagging power factor below 0.8 results in the engine having surplus kW to power the alternator in excess of its 100% kVA rating

Kurva Kemampuan Generator

DEFINITIONS:

- 1- **Overexcited operation:** Lagging operation of the generator to provide MVARs to the grid.
- 2- **Underexcited operation:** Leading operation of the generator to draw MVARs from the grid.



Kurva Kemampuan Generator

Synchronous Generators and Leading Power Factor Loads

Sometimes loads impose a leading power factor on the power source. These loads do not present any problems when powered by the utility, however, if the generator is the power source, the leading power factor can cause instability or even failures.

The generator is designed to generate kW (real power) and kVAR (reactive power) but is unable to absorb kW and kVAR flowing in the opposite direction except in very small amounts dictated by the Alternator Capability Curve. This curve is not a common curve for a given make of alternator, but precisely established for a given rating and frame.

The example of one of these curves is shown in Figure 1.

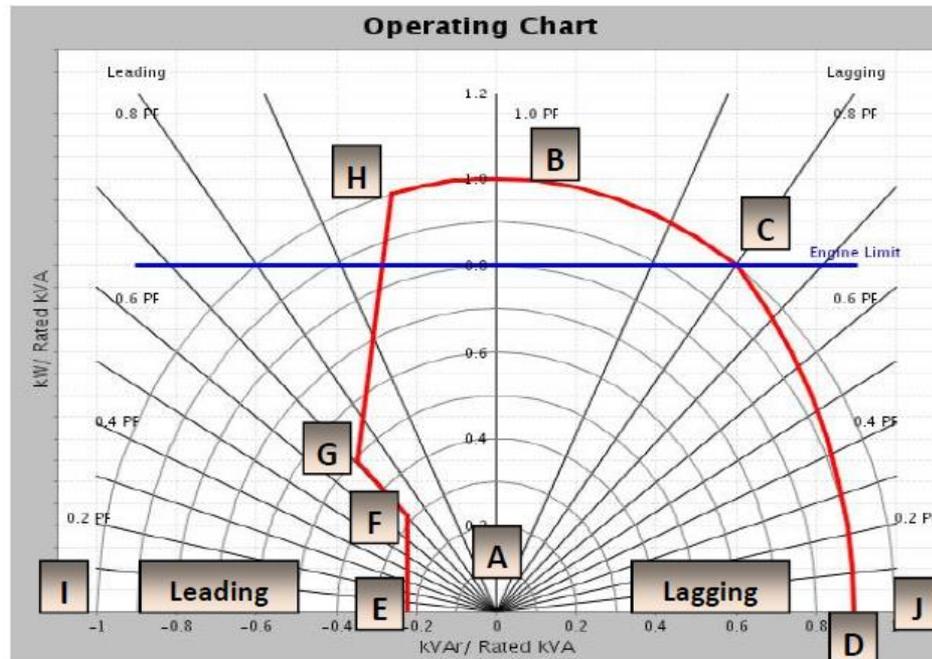
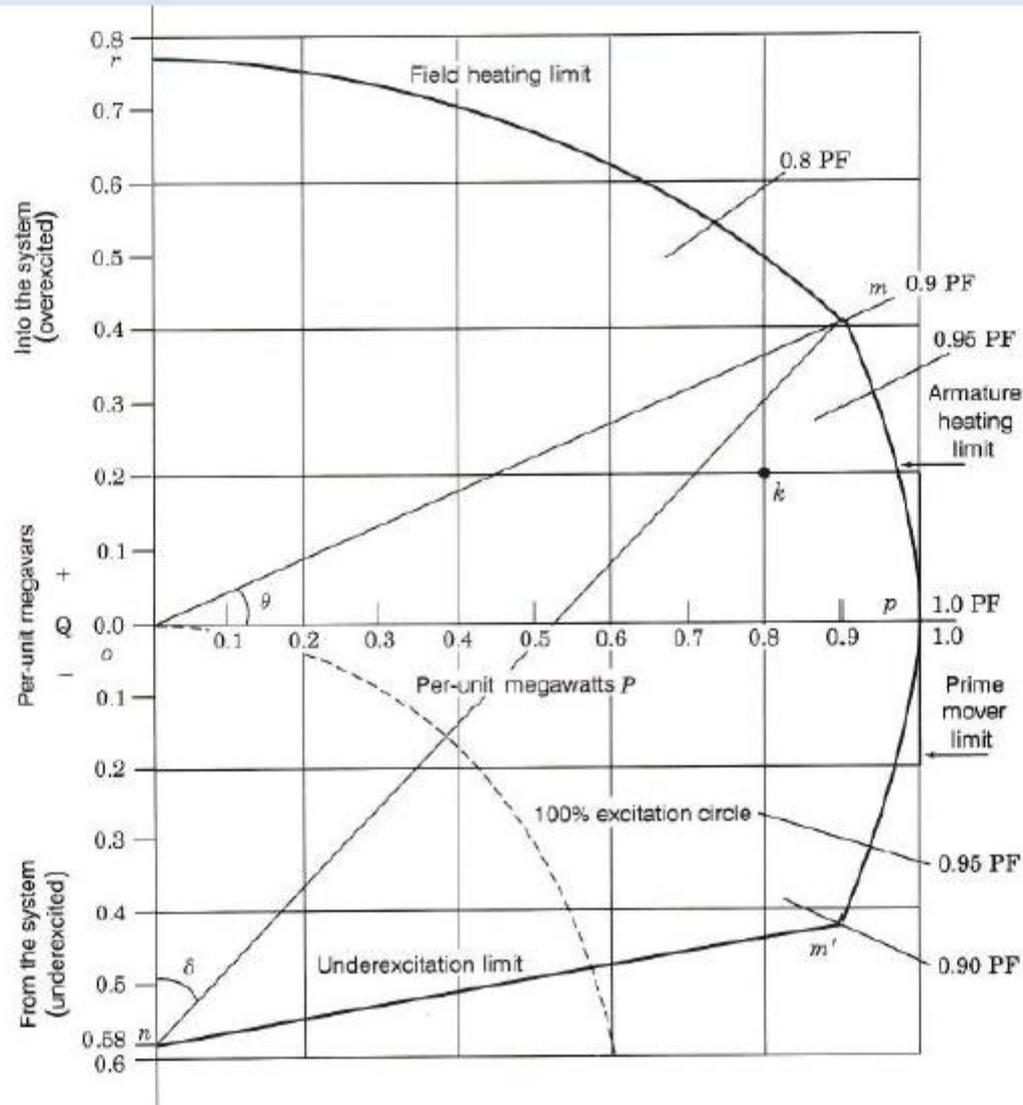


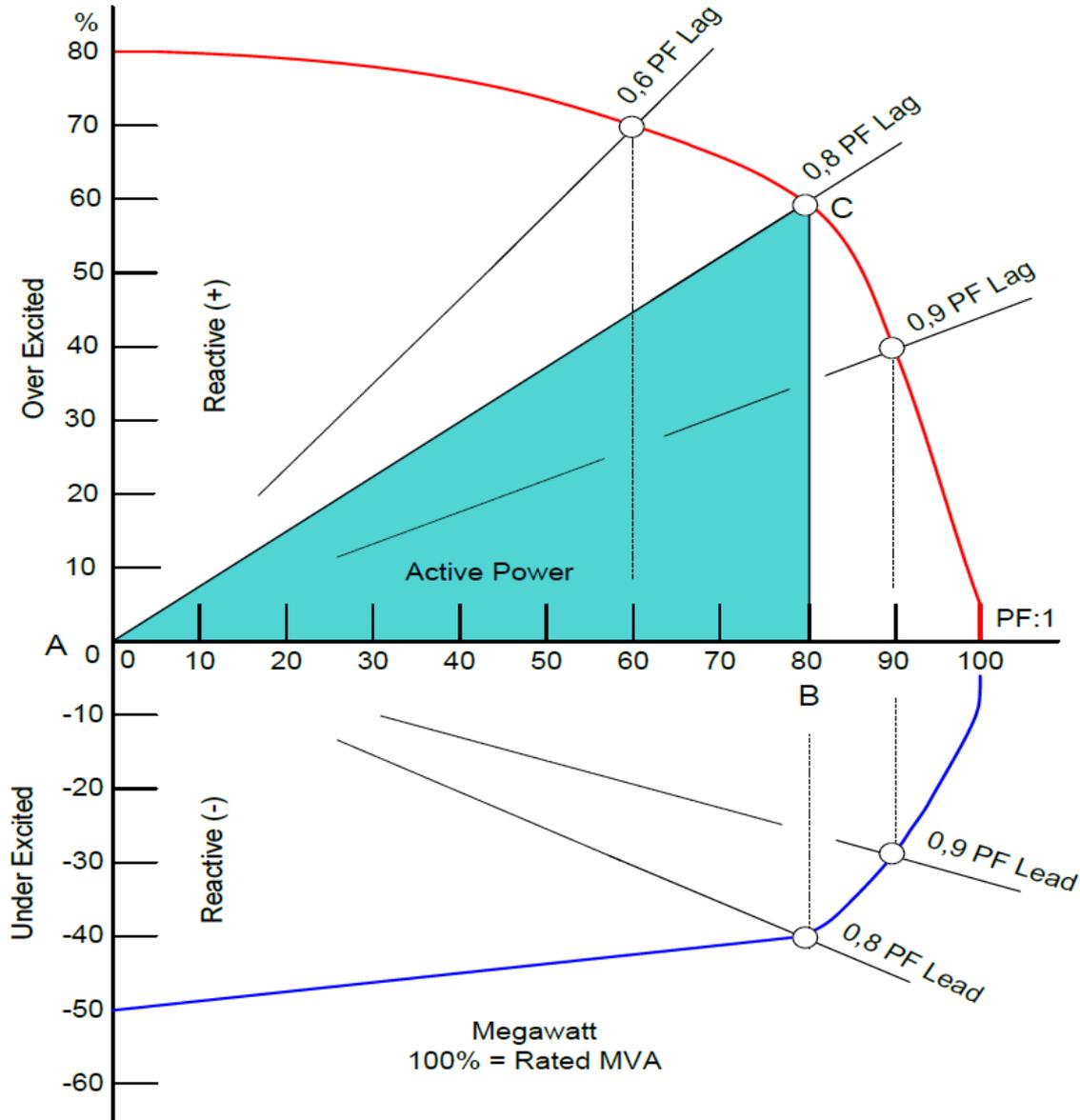
Figure 1 – Alternator Capability Curve

Kurva Kemampuan Generator

Generator Loading Capability Curve



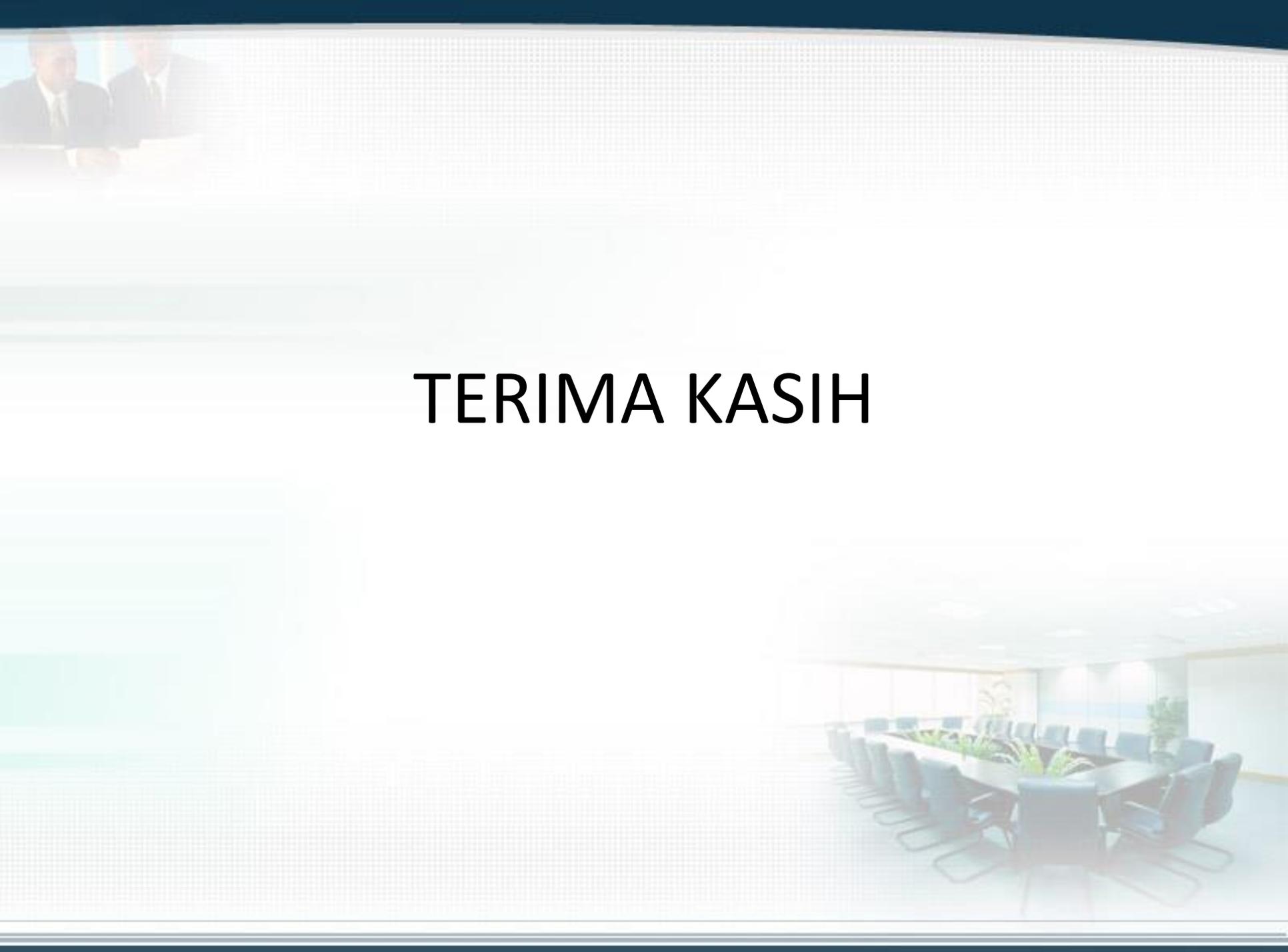
KURVA KEMAMPUAN GENERATOR



Gambar : 17. Kurva Kemampuan Generator

Latihan Soal

1. Sebutkan Komponen atau bagian dari Sistem Tenaga Listrik.
2. Sebutkan berbagai jenis pembangkit yang anda ketahui beserta komponen utamanya.
3. Apa jenis generator yang digunakan pada pusat pembangkit listrik AC.
4. Jelaskan bagaimana generator bisa menghasilkan gaya gerak listrik.
5. Sebutkan hukum kelistrikan yang mendasari kerja dari generator
6. Jelaskan konstruksi dari generator?
7. Bagaimana cara mengendalikan generator AC?
8. Apa saja yang menentukan besarnya GGL induksi dari generator
9. Generator harus diputar berapa RPM agar menghasilkan frekuensi tegangan yang dihasilkan 50 Hz.
10. Apa yang dimaksud dengan eksitasi generator?
11. Apa fungsi governor dan AVR pada sistem pembangkit
12. Apa tujuan dilakukan parallel generator dan sebutkan syarat-syaratnya.



TERIMA KASIH