



TEKNIK PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK JILID 1

untuk SMK

H. Supari Muslim

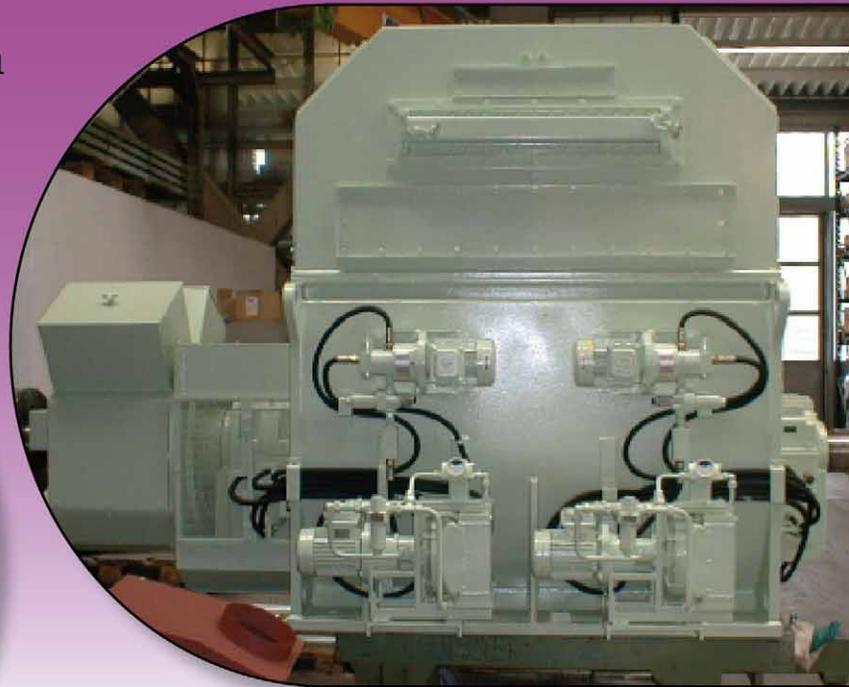


JILID 1

H. Supari Muslim

# Teknik Pembangkit TENAGA LISTRIK

untuk  
Sekolah Menengah Kejuruan



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Supari Muslim, dkk.

# TEKNIK PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK JILID 1

**SMK**



**Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan**  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional  
Dilindungi Undang-undang

# TEKNIK PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK JILID 1

Untuk SMK

Penulis : Supari Muslim  
Joko  
Puput Wanarti R

Perancang Kulit : TIM

Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

MUS MUSLIM, Supari  
t Teknik Pembangkit Tenaga Listrik Jilid 1 untuk SMK /oleh  
Supari Muslim, Fahmi PoernJoko, Puput Wanarti R ---- Jakarta :  
Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat  
Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah,  
Departemen Pendidikan Nasional, 2008.  
xii, 234 hlm  
Daftar Pustaka : Lampiran. A  
Daftar Istilah : Lampiran. B dst  
ISBN : 978-979-060-097-3  
ISBN : 978-979-060-098-0

Diterbitkan oleh

**Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan**

Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Tahun 2008

## KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan karunia Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, telah melaksanakan kegiatan penulisan buku kejuruan sebagai bentuk dari kegiatan pembelian hak cipta buku teks pelajaran kejuruan bagi siswa SMK. Karena buku-buku pelajaran kejuruan sangat sulit di dapatkan di pasaran.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK dan telah dinyatakan memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh penulis yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para pendidik dan peserta didik SMK. Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Dengan ditayangkan *soft copy* ini diharapkan akan lebih memudahkan bagi masyarakat khususnya para pendidik dan peserta didik SMK di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri untuk mengakses dan memanfaatkannya sebagai sumber belajar.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para peserta didik kami ucapkan selamat belajar dan semoga dapat memanfaatkan buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, 17 Agustus 2008  
Direktur Pembinaan SMK

# KATA PENGANTAR

---

Segala puji dan syukur kami panjatkan ke Hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa, atas rahmat dan hidayahnya sehingga penulisan buku dengan judul: Teknik Pembangkitan Tenaga Listrik ini dapat kami selesaikan sesuai dengan jadwal waktu yang diberikan.

Buku Teknik Pembangkitan Tenaga Listrik ini terdiri dari 13 Bab, yaitu:  
**Bab I** : Pendahuluan, berisi tentang pembangkitan tenaga listrik, jenis-jenis pusat pembangkit listrik, instalasi pada pusat pembangkit listrik, masalah utama dalam pembangkitan tenaga listrik, sistem interkoneksi, proses penyaluran tenaga listrik, dan mutu tenaga listrik. dan diuraikan juga mengenai pemeliharaan, latihan dan tugas.

**Bab II** : Instalasi listrik pada pusat pembangkit listrik, berisi tentang instalasi pada pusat pembangkit listrik, jenis peralatan, prinsip kerja, pemeliharaan dan perbaikannya, termasuk di dalamnya berisi keselamatan kerja, latihan dan tugas.

**Bab III** : Masalah operasi pada pusat-pusat listrik, berisi tentang cara pengoperasian dan pemeliharannya pada pusat-pusat listrik, dan keselamatan kerja.

**Bab IV** : Pembangkit dalam sistem interkoneksi, berisi tentang operasionalisasi dan pemeliharaan pada sistem interkoneksi, latihan dan tugas.

**Bab V** : Manajemen pembangkitan, berisi tentang: manajemen biaya operasi, manajemen pemeliharaan, suku cadang, laporan pemeliharaan, dan laporan kerusakan, latihan dan tugas.

**Bab VI** : Gangguan, pemeliharaan dan perbaikan mesin listrik, berisi tentang gangguan, pemeliharaan, dan perbaikan mesin listrik. Materi yang disajikan berbasis kondisi riil dilapangan dan didalamnya juga berisi format-format yang berlaku di perusahaan, latihan dan tugas.

**BAB VII** : Pemeliharaan sumber arus searah, berisi tentang: pemakaian baterai akumulator dalam pusat pembangkit listrik dan pemeliharannya, gangguan-gangguan dan pemeliharaan mesin listrik generator arus searah, latihan dan tugas.

**Bab VIII** : Sistem pemeliharaan pada pembangkit listrik tenaga air, berisi tentang kegiatan pemeliharaan generator dan *governor*, pemeliharaan transformator, alat pengaman, pemeliharaan *accu*, keselamatan kerja, latihan dan tugas.

**Bab IX**: *Standart operational procedure (SOP)*, berisi tentang beberapa SOP pada PLTU, pengoperasian, pemeliharaan pusat pembangkit, SOP genset, pemeliharaan genset, latihan dan tugas.

**Bab X** Transformator tenaga, *switchgear*, pengaman *relay* (proteksi), sistem *excitacy*, unit AVR, dan pemeliharannya serta latihan dan tugas.

**Bab XI:** *Crane* dan *elevator/lift*, berisi tentang: tentang jenis motor yang digunakan, sistem pengereman, sistem kontrol, sistem instalasi dan rumus-rumus yang berkaitan dengan *crane* dan *lift*. Selain itu juga berisi tentang cara pemeliharaan, latihan dan tugas.

**Bab XII:** Telekomunikasi untuk industri tenaga listrik, berisi tentang klasifikasi telekomunikasi untuk industri tenaga listrik, komunikasi dengan kawat, komunikasi dengan pembawa saluran tenaga, rangkaian transmisi, komunikasi radio, komunikasi gelombang mikro, pemeliharaan, latihan dan tugas.

**Bab XIII** Alat-alat ukur, berisi tentang prinsip kerja, cara penggunaan dan pemakaian, cara pemeliharaan alat ukur pada sistem tenaga listrik serta latihan dan tugas.

Selain ke tiga belas bab di atas, pada lampiran juga dibahas tentang undang-undang keselamatan kerja dan penanggulangan kebakaran yang terkait dengan pembangkitan tenaga listrik.

Kesemua isi dalam ke tiga belas bab mencerminkan secara lebih lengkap untuk mencapai kompetensi program keahlian pembangkitan tenaga listrik, walaupun tidak setiap sub kompetensi diuraikan sendiri-sendiri tetapi juga saling berkaitan, tetapi isi buku materi telah membahas: Dasar Dasar Kelistrikan dan Elektronika, Memelihara Instalasi Listrik Unit, Memelihara Peralatan Elektronik, Memelihara DC Power, Memelihara Peralatan Komunikasi, Memelihara *Gen-set*, Memelihara *Crane*, Memelihara Generator, Memelihara Transformator, Memelihara Proteksi, Memelihara Kontrol Instrumen, dan Memelihara *Switchgear* dan implementasinya.

Susunan buku dari awal sampai akhir secara lengkap, seperti yang tercantum dalam daftar isi.

Susunan Bab tersebut di atas disusun berdasarkan Kurikulum 2004 beserta kompetensinya, sehingga dengan merujuk kepada referensi yang digunakan, serta Kurikulum Tingkat satuan Pendidikan (KTSP), buku Teknik Pembangkit Tenaga Listrik berujud seperti keadaannya sekarang.

Buku dapat disusun atas bantuan berbagai pihak. Untuk itu dalam kesempatan yang berharga ini kami sampaikan banyak terima kasih dan penghargaan, termasuk ucapan terimakasih disampaikan kepada saudara Indra Wiguna dan Gigih Adjie Biyantoro yang telah banyak membantu.

Disadari bahwa isi maupun susunan buku ini masih ada kekurangan. Bagi pihak-pihak yang ingin menyampaikan saran dan kritik akan kami terima dengan senang hati dan ucapan terima kasih.

Penulis

# DAFTAR ISI

	Halaman
SAMBUTAN DIREKTORAT PSMK	lii
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	vii
BUKU JILID 1	
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Pembangkitan Tenaga Listrik	1
B. Jenis-jenis Pusat Pembangkit Listrik	10
C. Instalasi Listrik pada Pusat Pembangkitan Listrik	14
D. Masalah Utama dalam Pembangkitan Tenaga Listrik	16
E. Sistem Interkoneksi	20
F. Proses Penyaluran Tenaga Listrik	21
G. Mutu Tenaga Listrik	23
H. Latihan	24
I. Tugas	24
BAB II. INSTALASI LISTRIK PADA PUSAT PEMBANGKIT LISTRIK	25
A. Instalasi listrik Generator sinkron 3 phasa	25
B. Rel ( <i>Busbar</i> )	43
C. Saluran Kabel antara Generator sinkron 3 phasa dan Rel	48
D. Jenis-jenis Sakelar Tenaga	49
E. Mekanisme Pemutus Tenaga ( <i>Switchgear</i> )	72
F. Instalasi Pemakaian Sendiri	75
G. Baterai Aki	78
H. Transformator	81
I. Penumaian Bagian-Bagian Instalasi	104
J. Sistem <i>Excitacy</i>	105
K. Sistem Pengukuran	108
L. Sistem Proteksi	109
M. Perlindungan Terhadap Petir	113
N. Proteksi Rel ( <i>Busbar</i> )	116
O. Instalasi Penerangan bagian vital	117
P. Instalasi Telekomunikasi	118
Q. Arus Hubung Singkat	122
R. Pengawatan Bagian Sekunder	123
S. Cara Pemeliharaan	126
T. Perkembangan Isolasi Kabel	129
U. Generator Asinkron	133
V. Latihan	144
W. Tugas	144
BAB III MASALAH OPERASI PADA PUSAT-PUSAT LISTRIK	145

A. Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA)	145
B. Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)	160
C. Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG)	180
D. Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)	184
E. Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)	189
F. Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD)	198
G. Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	206
H. Unit Pembangkit Khusus	209
I. Pembangkit Listrik Non Konvensional	211
J. Bahan Bakar	213
K. Turbin <i>Cross Flow</i>	224
L. Perlindungan Katodik ( <i>Cathodic Protection</i> )	225
M. Pemadam Kebakaran	228
N. Beberapa Spesifikasi Bahan Bakar	230
O. Latihan	234
P. Tugas	234
BUKU JILID 2	
BAB IV PEMBANGKITAN DALAM SISTEM INTERKONEKSI	235
A. Sistem Interkoneksi dan Sistem yang Terisolir	235
B. Perkiraan Beban	236
C. Koordinasi Pemeliharaan	242
D. Faktor-faktor dalam Pembangkitan	244
E. Neraca Energi	246
F. Keandalan Pembangkit	248
G. Keselamatan Kerja dan Kesehatan Kerja	249
H. Prosedur Pembebasan Tegangan dan Pemindahan Beban	252
I. Konfigurasi Jaringan	259
J. Otomatisasi	261
K. Kendala-Kendala Operasi	262
L. Latihan	264
M. Tugas	264
BAB V MANAJEMEN PEMBANGKITAN	265
A. Manajemen Operasi	265
B. Manajemen Pemeliharaan	267
C. Suku Cadang	271
D. Laporan Pemeliharaan	272
E. Laporan Kerusakan	273
F. Latihan	280
G. Tugas	280
BAB VI GANGGUAN, PEMELIHARAAN DAN PERBAIKAN MESIN-MESIN LISTRIK	281
A. Gangguan, Pemeliharaan dan Perbaikan Generator Sinkron	281
B. Gangguan, Pemeliharaan dan Perbaikan pada Motor Sinkron	284

C. Gangguan, Pemeliharaan, dan Perbaikan Motor Asinkron	287
D Pemeriksaan Motor Listrik	293
E. Gangguan, Pemeliharaan dan Perbaikan pada Motor Induksi 1 phasa	299
F. Membelit Kembali Motor Induksi 3 Phasa	307
G. Latihan	345
H. Tugas	345
BAB VII PEMELIHARAAN SUMBER ARUS SEARAH	347
A. Pemakaian Baterai Akumulator dalam Pusat Pembangkit Tenaga Listrik	347
B. Gangguan-gangguan dan pemeliharaan Mesin Listrik Generator Arus Searah	364
C. Latihan	390
D. Tugas	390
BAB VIII SISTEM PEMELIHARAAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA)	391
A. Kegiatan Pemeliharaan Generator dan Governor Unit I	393
B. Kegiatan Pemeliharaan Transformator I (6/70 kV)	395
C. Kegiatan Pemeliharaan Mingguan ACCU Battery	396
D. Keselamatan Kerja	398
E. Latihan	399
F. Tugas	399
BAB IX <i>STANDARD OPERATION PROCEDURE (SOP)</i>	401
A. Umum	401
B. Prosedur Operasi Start Dingin PLTU Perak Unit III/IV	412
C. <i>BFP dan CWPC. Unit Start Up After 10 Hours Shut Down</i>	415
D. <i>UNIT Start Up Very Hot Condition</i>	417
E. Prosedur Start Kembali Setelah Gangguan Padam Total	419
F. <i>Normal Stop Untuk Electrical Control Board</i>	421
G. <i>Shut Down Unit (Operator BTB)</i>	422
H. <i>Shut Down</i>	424
I. Pengoperasian PadaTurning Gear	425
J. <i>Shut Down Unit (Operator Boiler Lokal)</i>	426
K. Pemeliharaan dan SOP Pada Pusat Pembangkit	426
L. SOP Genset	437
M. Latihan	448
N. Tugas	448
BUKU JILID 3	
BAB X TRANSFORMATOR DAYA, SWITCHGEAR, RELAY PROTECTION, EXCITACYDAN SYSTEM CONTROL	449
A. Tansformator Tenaga	449
B. <i>Switchgear</i>	466
C. <i>Relay</i> Proteksi	477

D. Sistem <i>Excitacy</i>	478
E. Unit AVR ( <i>Automatic Voltage Regulator</i> )	482
F. Pemeliharaan Sistem Kontrol	488
G. Latihan	491
H. Tugas	491
BAB XI <i>CRANE DAN ELEVATOR (LIFT)</i>	493
A. <i>Crane</i>	493
B. Instalansi <i>Lift/Elevator</i>	513
C. Pemeliharaan <i>Crane</i> dan <i>Lift</i>	519
D. Latihan	522
E. Tugas	522
BAB XII TELEKOMUNIKASI UNTUK INDUSTRI TENAGA LISTRIK	523
A. Klasifikasi Telekomunikasi Untuk Industri Tenaga Listrik	523
B. Komunikasi dengan Kawat	524
C. Komunikasi dengan Pembawa Saluran Tenaga	525
D. Rangkaian Transmisi	530
E. Komunikasi Radio	533
F. Komunikasi Gelombang Mikro	537
G. Pemeliharaan Alat Komunikasi Pada Pusat Pembangkit Listrik	540
H. Latihan	541
I. Tugas	541
BAB XIII ALAT UKUR LISTRIK	543
A. Amperemeter	543
B. Pengukuran Tegangan Tinggi	547
C. Pengukuran Daya Listrik	550
D. Pengukuran Faktor Daya	553
E. Pengukuran Frekuensi	558
F. Alat Pengukur Energi Arus Bolak-Balik	562
G. Alat-Alat Ukur Digital	566
H. <i>Megger</i>	578
I. Avometer	579
J. Pemeliharaan Alat Ukur	579
K. Latihan	581
L. Tugas	581
LAMPIRAN A. DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN B. DAFTAR ISTILAH	
LAMPIRAN C. DAFTAR TABEL	
LAMPIRAN D. DAFTAR GAMBAR	
LAMPIRAN E. DAFTAR RUMUS	
LAMPIRAN F. SOAL-SOAL	
LAMPIRAN 1. UU Keselamatan Kerja	
LAMPIRAN 2. Penanggulangan Kebakaran	

# BAB I

## PENDAHULUAN

Bab pendahuluan menggambarkan secara singkat proses pembangkitan tenaga listrik, jenis-jenis pusat pembangkit listrik, permasalahan dalam pembangkitan tenaga listrik, proses penyediaan tenaga listrik, instalasi penyaluran tenaga listrik, dan kualitas tenaga listrik.

### A. Pembangkitan Tenaga Listrik

#### 1. Proses pembangkitan tenaga listrik

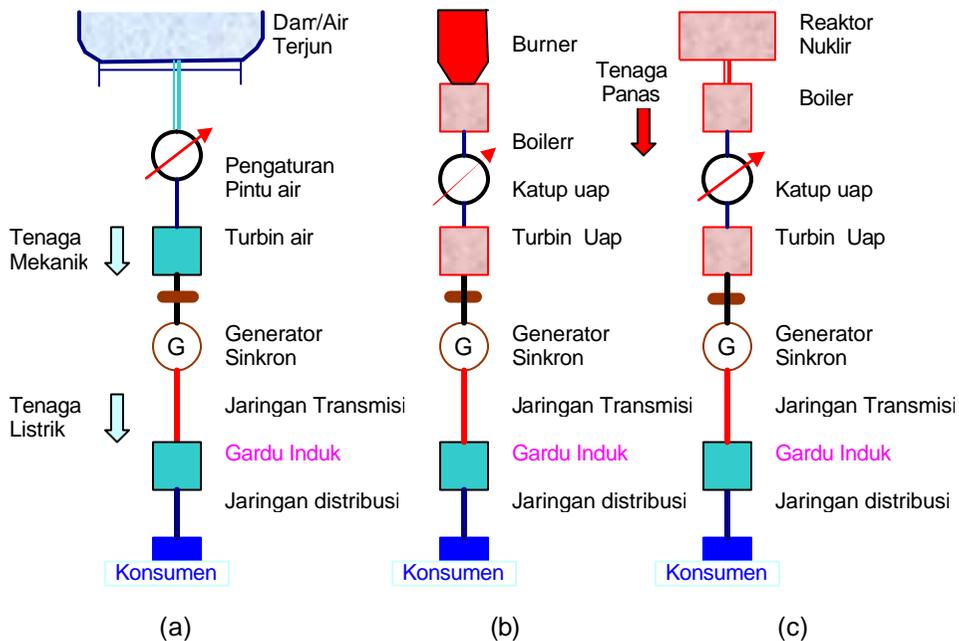
Pembangkitan tenaga listrik yang banyak dilakukan dengan cara memutar generator sinkron sehingga didapatkan tenaga listrik arus bolak-balik tiga fasa. Tenaga mekanik yang dipakai memutar generator listrik didapat dari mesin penggerak generator listrik atau biasa disebut penggerak mula (*primover*). Mesin penggerak generator listrik yang banyak digunakan adalah mesin diesel, turbin uap, turbin air, dan turbin gas.

Mesin penggerak generator melakukan konversi tenaga primer menjadi tenaga mekanik penggerak generator. Proses konversi tenaga primer menjadi tenaga mekanik menimbulkan produk sampingan berupa limbah dan kebisingan yang perlu dikendalikan agar tidak menimbulkan masalah lingkungan.

Dari segi ekonomi teknik, komponen biaya penyediaan tenaga listrik terbesar adalah biaya pembangkitan, khususnya biaya bahan bakar. Oleh sebab itu, berbagai teknik untuk menekan biaya bahan bakar terus berkembang, baik dari segi unit pembangkit secara individu maupun dari segi operasi sistem tenaga listrik secara terpadu.

Proses pembangkitan tenaga listrik adalah proses konversi tenaga primer (bahan bakar atau potensi tenaga air) menjadi tenaga mekanik sebagai penggerak generator listrik dan selanjutnya generator listrik menghasilkan tenaga listrik.

Gambar I.1 menunjukkan diagram poses pembangkitan tenaga listrik, mulai dari tenaga primer sampai dengan konsumen (*consumers*): (a) Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA); (b) Pusat Listrik Tenaga Panas (PLTP); dan (c) Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).



Gambar I.1

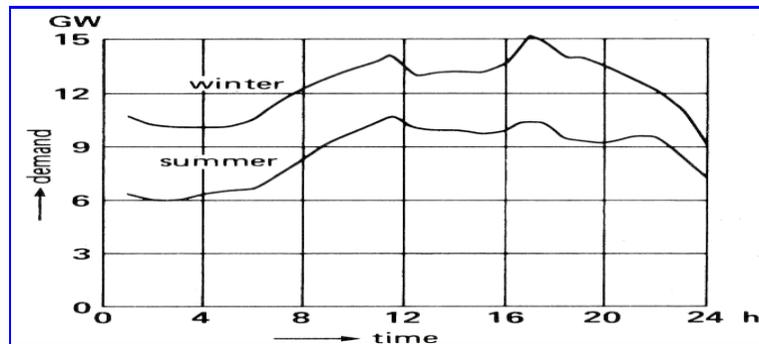
Diagram Proses Pembangkitan Tenaga Listrik

Untuk pembangunan pusat tenaga listrik, mempertimbangkan kebutuhan (*demand*) beban rata-rata harian, yaitu mempertimbangkan besar daya yang dibangkitkan pada hari tersebut. Gambar I.2 menunjukkan Diagram contoh beban listrik harian. Beban rata-rata harian adalah luas diagram beban harian dibagi 24 jam dan faktor beban adalah perbandingan antara beban rata-rata dan beban maksimum selama periode tersebut

Beban pusat listrik selalu berubah pada setiap saat dan tenaga listrik yang digunakan juga dipengaruhi oleh cuaca, musim hujan atau musim panas (*summer*) atau kemarau, dan hari kerja di industri atau perusahaan. Beban pusat listrik alam rentang 1 (satu) tahun merupakan jumlah beban rata-rata harian dikalikan 365 hari.

Untuk mencapai ongkos tiap kiloWatt jam serendah-rendahnya, haruslah diusahakan:

- Faktor beban sebesar-besarnya, artinya diagram beban aliran sedatar mungkin.
- Lama pemakaian sebesar - besarnya, artinya beban selama tahun-tahun itu harus sedikit mungkin berubahnya.



Gambar I.2  
Contoh Diagram Beban Listrik Harian

Dari Gambar I.2 tampak bahwa beban listrik paling tinggi (puncak) terjadi sekitar jam 8-12 pagi untuk musim panas (*summer*) sebesar 11,5 GW dan 15 GigaWatt untuk musim hujan (*winter*) terjadi antara pukul 16.00-20.00 Untuk menentukan beban rata-rata adalah kebesaran beban yang paling tinggi (*runcing*) dibagi dua (pembagian secara kasar).

Dengan mempertimbangkan diagram beban harian dan uraian-uraian tentang sifat pemakaian tenaga listrik, maka pembangunan pusat listrik dapat ekonomis. Untuk menentukan macam tenaga mekanisnya suatu pusat listrik dipertimbangkan juga dari diagram beban harian.

Misalnya:

- Untuk mengatasi beban rata-rata sebaiknya dari pusat listrik tenaga *hydro*, karena biaya operasi tiap harinya murah, tetapi modal pembangunan pertama kalinya tinggi (mahal).
- Untuk mengatasi beban puncak sebaiknya dari pusat listrik tenaga *termo* terutama dengan penggerak motor diesel. Dengan pertimbangan beban puncak berlangsung relatif pendek (sementar), dan secara umum pusat tenaga listrik ini relatif murah dibanding pusat listrik tenaga *hydro* walaupun biaya operasi hariannya lebih mahal.
- Untuk mengatasi beban rata-rata tidak hanya dengan pusat listrik tenaga *hydro*, adakalanya dibantu dengan pusat listrik tenaga *termo* dalam hal ini pusat listrik tenaga uap (PLTU).

Walaupun demikian, PLTU memiliki sifat tidak secepat seperti pusat listrik tenaga disel dalam mengambil alih tenaga listrik pada waktu cepat, sebab memerlukan waktu penyesuaian.

Pembangkitan energi listrik yang banyak dilakukan dengan cara memutar generator sinkron sehingga didapat tenaga listrik arus bolak-balik tiga

fasa. Energi mekanik yang dipakai memutar generator listrik didapat dari mesin penggerak generator listrik atau biasa disebut penggerak mula (*primover*). Mesin penggerak generator listrik yang banyak digunakan adalah mesin diesel, turbin uap, turbin air, dan turbin gas.

Mesin penggerak generator melakukan konversi energi primer menjadi energi mekanik penggerak generator. Proses konversi energi primer menjadi energi mekanik menimbulkan produk sampingan berupa limbah dan kebisingan yang perlu dikendalikan agar tidak menimbulkan masalah lingkungan.

Dari segi ekonomi teknik, komponen biaya penyediaan tenaga listrik terbesar adalah biaya pembangkitan, khususnya biaya bahan bakar. Oleh sebab itu, berbagai teknik untuk menekan biaya bahan bakar terus berkembang, baik dari segi unit pembangkit secara individu maupun dari segi operasi sistem tenaga listrik secara terpadu. Gambar 1.3 menunjukkan contoh *power generator comersial* di India.



Gambar 1.3  
Contoh Power Generator Comersial di India

## 2. Kelengkapan pada pusat pembangkit listrik

Kelengkapan pada pusat pembangkit listrik antara lain adalah:

- a) Instalasi sumber energi (energi primer, yaitu instalasi bahan bakar untuk pusat pembangkit termal dan atau instalasi tenaga air)
- b) Instalasi mesin penggerak generator listrik, yaitu instalasi yang berfungsi sebagai pengubah energi primer menjadi energi mekanik sebagai penggerak generator listrik
- c) Mesin penggerak generator listrik dapat berasal dari ketel uap beserta turbin uap, mesin diesel, turbin gas, dan turbin air
- d) Instalasi pendingin, yaitu instalasi yang berfungsi mendinginkan instalasi mesin penggerak yang menggunakan bahan bakar.
- e) Instalasi Listrik, yaitu instalasi yang secara garis besar terdiri dari:
  - 1) Instalasi tegangan tinggi, yaitu instalasi yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik yang dliangkitkan generator listrik
  - 2) Instalasi tegangan rendah, yaitu instalasi pada peralatan bantu dan instalasi penerangan,
  - 3) Instalasi arus searah, yaitu instalasi baterai aki dan peralatan pengisiannya serta jaringan arus searah terutama yang digunakan untuk proteksi, kontrol, dan telekomunikasi.

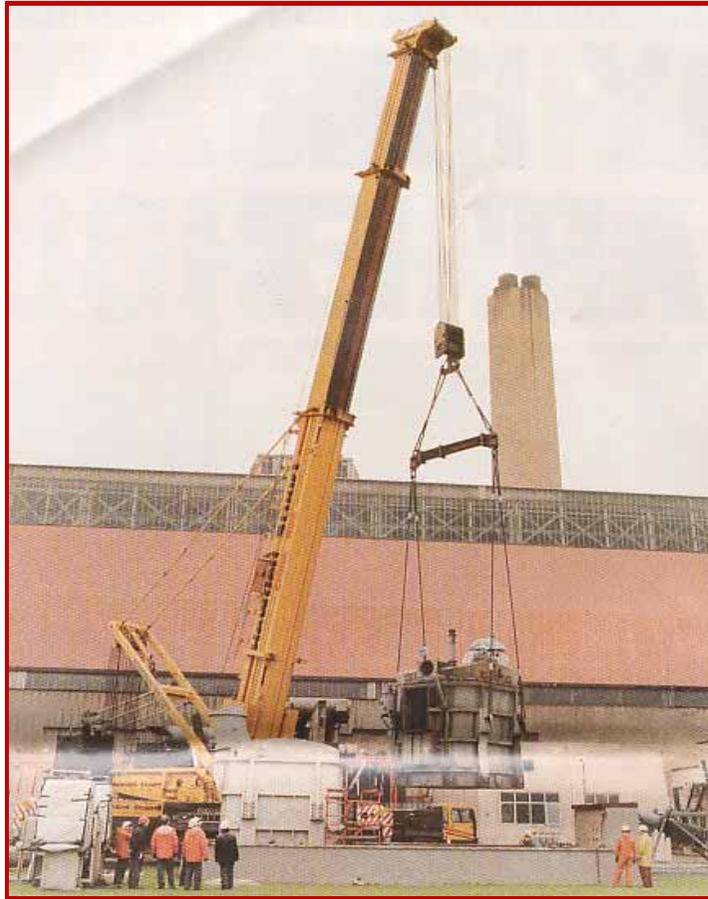
## 3. Hal-hal yang diperhatikan dalam perencanaan pembangkitan (*system planning*) tenaga listrik

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam merencanakan pembangkit tenaga listrik adalah:

- a) Perkiraan beban (*load forecast*)

Terkait dengan rencana jangka waktu pembangkitan (misal 15-20 tahun), besar beban puncak, beban harian, dan beban tahunan, dan lain-lain terkait dengan jangka waktu.
- b) Perencanaan pengembangan (*generation planning*)

Harus dilakukan perencanaan pengembangan kapasitas, biaya produksi, dan memperhitungkan investasi dan pendapatan atau hasilnya. Gambar 1.4 menunjukkan pengangkatan transformator menggunakan *crane* untuk pengembangan pusat pembangkit listrik.



Gambar I.4

Pengangkatan Transformator menggunakan *Crane* untuk Pengembangan Pusat Pembangkit Listrik

- c) Perencanaan penyaluran (*transmission planning*) Diantaranya adalah memperhatikan pengembangan transmisi dari tahun ke tahun, sistem transmisi, biaya pembebasan lahan yang dilalui transmisi, sistem interkoneksi, rangkaian instalasi transmisi, biaya konstruksi transmisi, sistem transmisi, dan lain-lain. Gambar I.5 menunjukkan contoh konstruksi transmisi.



Gambar I.5  
Contoh Konstruksi Transmisi

- d) Perencanaan subtransmisi (*subtransmission planning*)
- e) Perencanaan distribusi (*distribution planning*)  
Memperhatikan rencana *supply* utama pada bulk station, besar tegangan subtransmisi, sistem jaringan subtransmisi, dan lain-lain.



Gambar I.6  
Contoh konstruksi jaringan distribusi

- f) Perencanaan pengoperasian (*operation planning*)  
Merencanakan sistem pengoperasian, merencanakan program computer, *load flow program*, dan lainnya agar pengoperasian dapat

efektif dan efisien. Gambar I.7 menunjukkan *system grid operation* pada *power plant*.



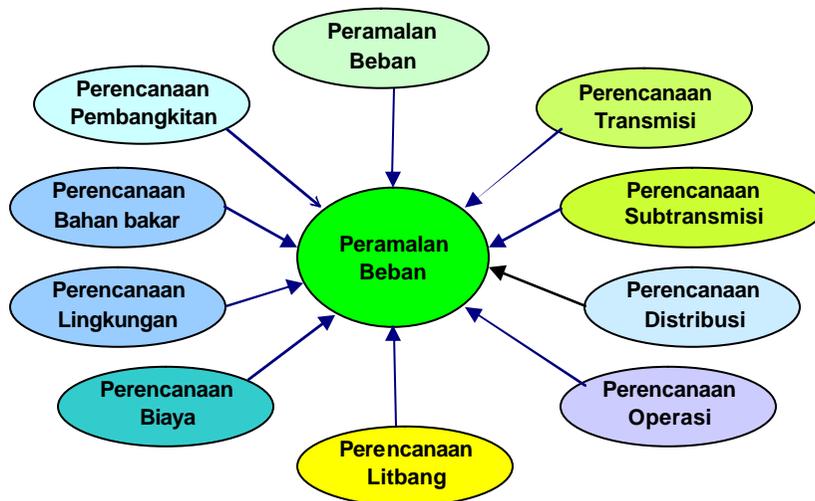
Gambar I.7  
Sistem *Grid Operation* pada *Power Plant*

- g) *Supply* bahan bakar (*fuel supply planning*) atau sumber tenaga primer/bahan baku)  
Merencanakan kebutuhan bahan baik atau sumber energi primer, ketersediaan bahan bakar, sistem pengiriman, dan lain-lain.
- h) Perencanaan lingkungan (*environment planning*) atau perencanaan kondisi lingkungan. Memperhatikan lingkungan sekitar, bentuk *plant*, lokasi, dan desain pengolahan limbah, dan lain-lain. Contoh pembangunan PLTD yang memperhatikan lingkungan ditunjukkan pada Gambar I.8.
- i) Perencanaan pendapatan (*Financial planning*).
- j) Riset dan pengembangan (*research & development planning/R&D planning*)  
Riset dan pengembangan terkait pengembangan sistem pembangkit, meliputi biaya, karakteristik, dan kelayakan alternatif sumber energi dan pengembangan teknologi, dan lain-lain.



Gambar I.8  
Pembangunan PLTD yang memperhatikan Lingkungan

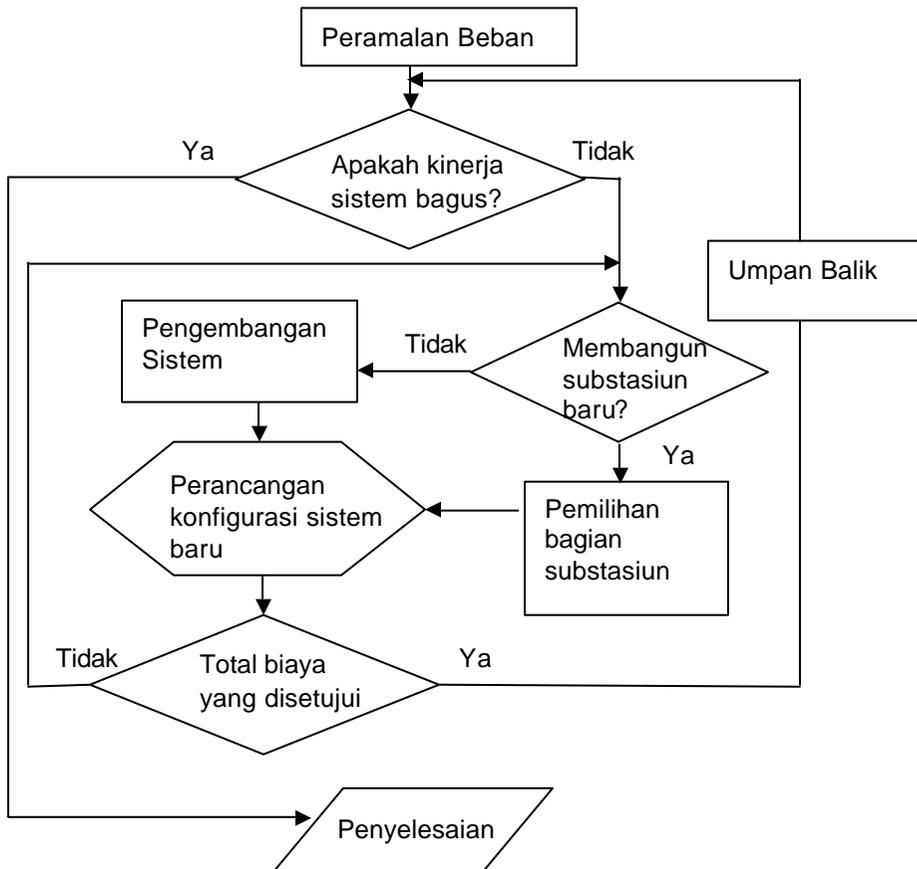
Gambar I.9 menunjukkan aktivitas yang harus dilakukan pada perencanaan sistem pembangkit tenaga listrik.



Gambar I.9  
Aktivitas yang harus dilakukan pada Perencanaan  
Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Diagram aktivitas yang harus dilakukan pada perencanaan sistem pembangkit tenaga listrik.

Gambar I.10 menunjukkan blok diagram proses merencanakan bentuk sistem distribusi.



Gambar I.10

Blok Diagram Proses Merencanakan Bentuk Sistem Distribusi

## B. Jenis-jenis Pusat Pembangkit Listrik

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

## 1. Pusat listrik tenaga *thermo*

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

Pusat pembangkit listrik tenaga *thermo*, terdiri dari:

a) Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU).

Pada pusat listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar batu bara, minyak, atau gas sebagai sumber energi primer.

Untuk memutar generator pembangkit listrik menggunakan putaran turbin uap. Tenaga untuk menggerakkan turbin berupa tenaga uap yang berasal dari ketel uap. Bahan bakar ketelnya berupa batu bara, minyak bakar, dan lainnya.

b) Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Pada pusat listrik tenaga gas, energi primer berasal dari bahan bakar gas atau minyak. Untuk memutar generator pembangkit listrik menggunakan tenaga penggerak turbin gas atau motor gas. Untuk memutar turbin gas atau motor gas menggunakan tenaga gas. Gas berasal dari dapur tinggi, dapur kokas, dan gas alam.

c) Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pada pusat pembangkit listrik tenaga diesel, energi primer sebagai energi diesel berasal dari bahan bakar minyak atau bahan bakar gas. Untuk memutar generator pembangkit listrik menggunakan tenaga pemutar yang berasal dari putaran diesel.

d) Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pusat listrik tenaga gas dan uap merupakan kombinasi PLTG dengan PLTU. Gas buang dari PLTG dimanfaatkan untuk menghasilkan uap oleh ketel uap dan menghasilkan uap sebagai penggerak turbin uap. Turbin uap selanjutnya memutar generator listrik

e) Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

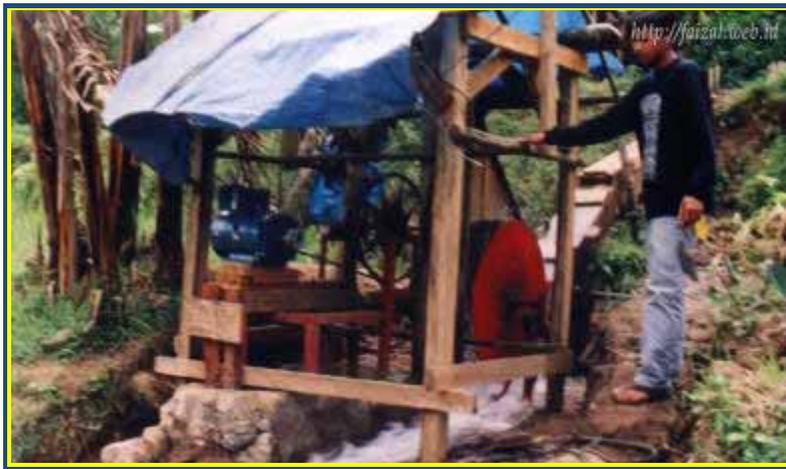
Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan pusat pembangkit yang tidak memiliki ketel uap karena uap sebagai penggerak turbin uap berasal dari dalam bumi

## 2. Pusat listrik tenaga *hydro*

Pusat listrik yang menggunakan tenaga air atau sering disebut Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA). Pada pusat listrik tenaga air, energi utamanya berasal dari tenaga air (energi primer). Tenaga air tersebut menggerakkan turbin air dan turbin air memutar generator listrik. Pusat listrik ini menggunakan tenaga air sebagai sumber energi primer.

Pusat Listrik Tenaga Air dibagi menjadi 2 (dua), yaitu:

- a) Pusat listrik tenaga air daerah bukit, memanfaatkan selisih tinggi jatuhnya air yang tinggi.
- b) Pusat listrik tenaga air daerah datar, memanfaatkan debit air dan tinggi jatuhnya air rendah.



(A)

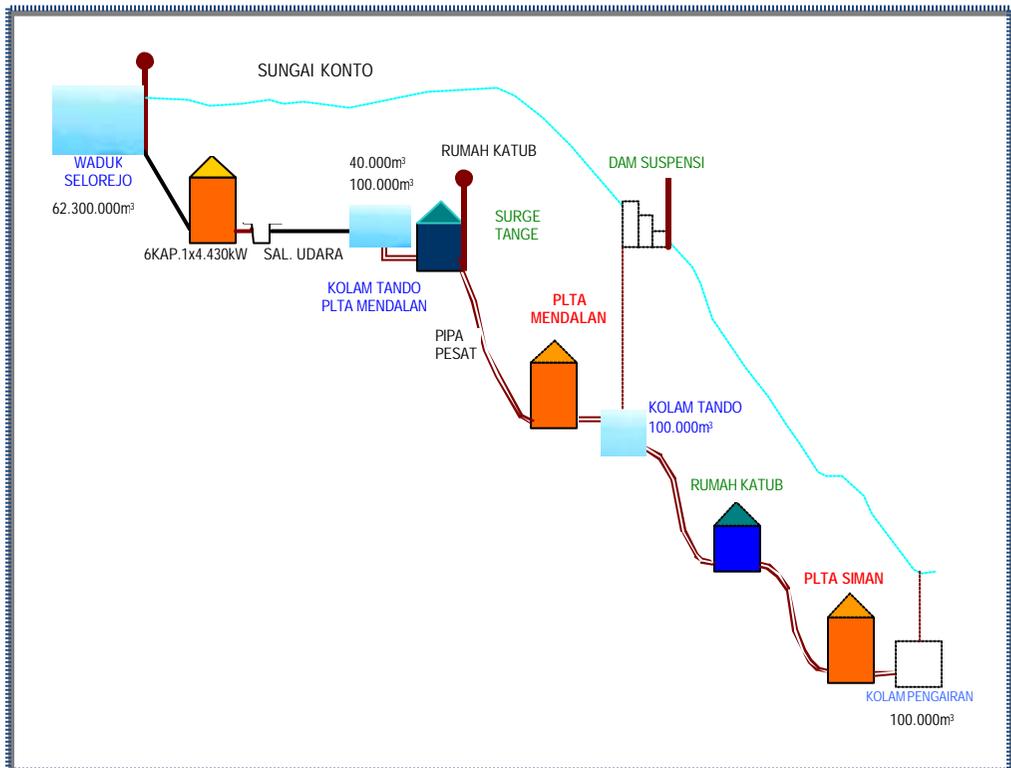


(B)

Gambar 1.11

PLTA mini hidro memanfaatkan debit air (A: tampak depan dan B: tampak samping)

(<http://faizal.web.id/sky/tutorial/energi-alternatif-dari-gunung-halimun/>)



Gambar I.12  
Proses penyaluran air  
PLTA Mendalan memanfaatkan tinggi jatuhnya air

Pusat listrik tenaga hydro banyak dipakai di negara-negara yang memiliki tenaga air sebagai sumber tenaga. Tenaga yang tertimbun dalam tenaga air adalah besar dan umumnya baru sebagian kecil yang sudah digunakan. Mendirikan pusat listrik tenaga *hydro* membutuhkan biaya besar, tetapi keuntungannya adalah ongkos operasi tiap kiloWatt rendah dibanding dengan pusat listrik tenaga *thermo*.

Pusat listrik daerah bukit terutama menggunakan air terjun yang tinggi. Suatu contoh pusat listrik daerah bukit yang ada di Jawa Timur, misalnya:

Mendalan, Siman, Karang Kates. Di Jawa Tengah, Tuntang, Kec. (Banyumas) dan di Jawa Barat Jati Luhur.

Keadaan alam sering membantu meringankan ongkos operasi dan pembuatan Pusat Listrik Tenaga Air. Hal yang penting ialah mengatur debit air. Debit air selama satu tahun, sedang pusat listrik sehari-harinya melayani pemakaian tenaga listrik, maka reservoir digunakan untuk mengatasinya.

Pusat listrik tenaga hydro daerah datar kalah populer dari pada pusat listrik daerah bukit. Pusat listrik daerah datar mengutamakan banyaknya air sebagai sumber tenaga, sedang terjunnya air adalah hal sekunder. Berhubung dengan ini pusat listrik daerah air letaknya di tepi sungai (sungai kecil) atau di atasnya dam. Dam dibuat sedemikian rupa hingga air mudah dibuang apabila meluap (banjir). Dalam hal ini sulit mengatur debit air, karena sulit menyimpan air yang banyak, sedang tinggi terbatas, sehingga hanya bisa diselenggarakan akumulasi harian. Sebagai alat penggerak mekanis pada pusat pembangkit adalah turbin air.

### 3. Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

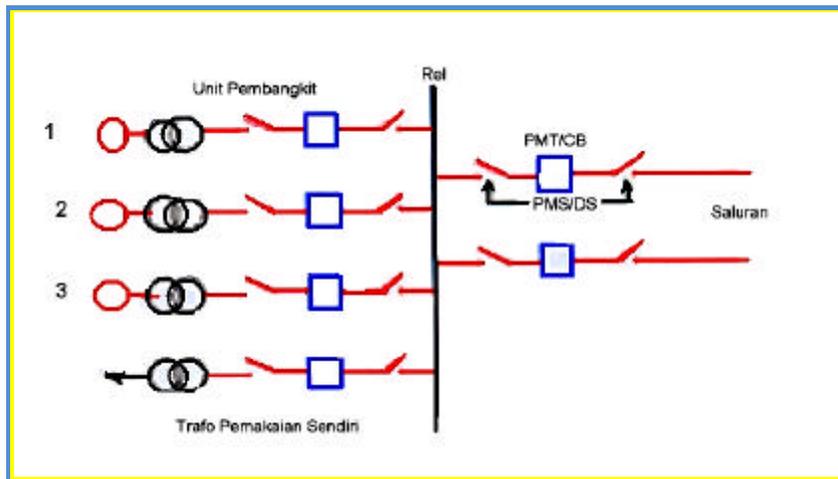
Pada pusat pembangkit ini, tenaga nuklir diubah menjadi tenaga listrik. Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan PLTU yang menggunakan uranium sebagai bahan bakar dan menjadi sumber energi primer. Uranium mengalami proses fusi (*fussion*) di dalam reaktor nuklir yang menghasilkan energi panas. Energi panas yang dihasilkan digunakan untuk menghasilkan uap dalam ketel uap. Uap panas yang dihasilkan ketel uap selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin uap dan turbin uap memutar generator listrik.

Pusat listrik tenaga *thermo* berada di pusat pemakaian atau konsumen, kecuali pusat listrik tenaga nuklir. Sedangkan pusat listrik tenaga air berada jauh dari pusat pemakaian atau konsumen termasuk pusat listrik tenaga nuklir.

### C. Instalasi Listrik pada Pusat Pembangkitan Listrik

Secara umum, pusat pembangkit listrik membangkitkan tenaga listrik arus bolak-balik tiga fasa yang dihasilkan oleh generator sinkron.

Tegangan generator paling tinggi yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik adalah 23 kV. Pada saat ini, dalam tingkat riset sedang dikembangkan generator yang dapat membangkitkan tegangan listrik sampai 150 kV. Diagram satu garis instalasi tenaga listrik pada pusat pembangkit listrik sederhana ditunjukkan pada Gambar I.13



Gambar I.13

Diagram satu garis instalasi tenaga listrik pada pusat pembangkit listrik sederhana

Keterangan:

PMT/CB = Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*)

PMS/DS = Sakelar Pemisah (*Disconnecting Switch*)

Pusat pembangkit listrik yang sudah beroperasi secara komersial secara umum ditunjukkan pada Gambar I.13. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sinkron dinaikkan dengan menggunakan transformator listrik sebelum dihubungkan pada rel (*busbar*) melalui pemutus tenaga (PMT).

Semua generator listrik yang menghasilkan energi listrik dihubungkan pada rel (*busbar*). Begitu pula semua saluran keluar dari pusat listrik dihubungkan dengan rel pusat listrik.

Saluran yang keluar dari rel pusat pembangkit listrik digunakan untuk mengirim tenaga listrik dalam jumlah besar ke lokasi pemakai (beban) dan digunakan untuk menyediakan tenaga listrik di lokasi sekitar pusat pembangkit listrik. Selain itu juga ada saluran (*feeder*) yang digunakan menyediakan tenaga listrik untuk keperluan pusat pembangkit sendiri yang digunakan untuk sumber tenaga listrik pada instalasi penerangan, mengoperasikan motor-motor listrik (motor listrik sebagai penggerak pompa air pendingin, motor listrik sebagai penggerak pendingin udara, motor listrik sebagai penggerak peralatan pengangkat,

keperluan kelengkapan kontrol, dan lain-lain). Pada pusat pembangkit listrik juga memiliki instalasi listrik dengan sumber tegangan listrik arus searah. Sumber listrik arus searah pada pusat pembangkit tenaga listrik digunakan untuk menggerakkan peralatan mekanik pada pemutus tenaga (PMT) dan untuk lampu penerangan darurat. Sumber listrik arus searah yang digunakan pada pusat pembangkit listrik adalah baterai aki yang diisi oleh penyearah.

#### **D. Masalah Utama dalam Pembangkitan Tenaga Listrik**

Proses pembangkitan energi listrik pada prinsipnya merupakan konversi energi primer menjadi energi mekanik yang berfungsi sebagai penggerak dan penggerak tersebut (energi mekanik) dikonversi oleh generator listrik menjadi tenaga listrik. Pada proses konversi tersebut pasti timbul masalah-masalah. Masalah yang timbul pada proses konversi energi tersebut diantaranya adalah:

##### **1. Penyediaan Energi Primer**

Energi primer untuk pusat pembangkit listrik *thermal* berupa bahan bakar. Penyediaan bahan bakar harus optimal, meliputi: pengadaan bahan bakar, transportasi bahan bakar, dan penyimpanan bahan bakar serta faktor keamanan dari resiko terjadinya kebakaran karena kebakaran dapat diakibatkan oleh faktor kelalaian manusia dalam menyimpan bahan bakar maupun akibat terjadinya reaksi kimia dari bahan bakar itu sendiri

Energi primer pada PLTA adalah air, proses pengadaanya dapat berasal asli dari alam dan dapat berasal dari sungai-sungai dan air hujan yang ditampung pada waduk atau bendungan.

Pada PLTA, diperlukan daerah konservasi hutan pada daerah aliran sungai (DAS) agar supaya hutan berfungsi sebagai penyimpan air sehingga tidak timbul banjir di musim hujan dan sebaliknya tidak terjadi kekeringan pada saat musim kemarau.

##### **2. Penyediaan air untuk keperluan pendingin**

Kebutuhan terpenuhinya penyediaan air pendingin khususnya pada pusat pembangkit listrik *thermal*, sangat penting keberadaannya seperti pada PLTU dan PLTD. Sedangkan pada PLTG kebutuhan air untuk keperluan pendinginan tidak memerlukan air pendingin yang banyak.

PLTU dan PLTD dengan daya terpasang melebihi 25 MW banyak yang dibangun di daerah pantai karena membutuhkan air pendingin dalam

jumlah besar sehingga PLTU dan PLTD dapat menggunakan air laut sebagai bahan untuk keperluan air pendingin.

Pada unit-unit PLTD yang kecil, atau di bawah 3 MW, proses pendinginannya dapat menggunakan udara yang berasal dari radiator.

### 3. Masalah Limbah

Pusat Listrik Tenaga Uap yang menggunakan bahan bakar batu bara, menghasilkan limbah abu batu bara dan asap yang mengandung gas  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , dan  $\text{NO}$ .

Semua PLTU menghasilkan limbah bahan kimia dari air ketel (*blow down*). Pada PLTD dan PLTG menghasilkan limbah yang berupa minyak pelumas.

PLTA tidak menghasilkan limbah, tetapi limbah yang berasal dari masyarakat yang masuk ke sungai sering menimbulkan gangguan pada PLTA.

### 4. Masalah Kebisingan

Pada pusat listrik *thermal* dapat menimbulkan suara keras yang merupakan kebisingan bagi masyarakat yang tinggal di sekitarnya, sehingga tingkat kebisingan yang ditimbulkan harus dijaga supaya tidak melampaui standar kebisingan yang ditetapkan.

### 5. Operasi

Operasi pusat pembangkit listrik sebagian besar 24 jam sehari. Selain itu biaya penyediaan tenaga listrik sebagian besar ( $\pm 60\%$ ) untuk operasi pusat pembangkit listrik, khususnya untuk pengadaan bahan bakar, sehingga perlu dilakukan operasi pusat pembangkit listrik yang efisien. Apabila pusat pembangkit listrik beroperasi dalam sistem interkoneksi, (yaitu pusat listrik yang beroperasi paralel dengan pusat-pusat pembangkit listrik lain melalui saluran transmisi), maka pusat pembangkit listrik harus mengikuti dan memenuhi pola operasi sistem interkoneksi.

### 6. Pemeliharaan

Pemeliharaan adalah kegiatan untuk menjaga atau memelihara fasilitas dan atau peralatan serta mengadakan perbaikan atau penyesuaian dan atau mengganti yang diperlukan sehingga terdapat suatu keadaan operasi produksi yang memuaskan.

Jenis pemeliharaan terdiri dari dua macam, yaitu:

- a) Pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*), dan
- b) Pemeliharaan perbaikan (*corrective* atau *breakdown maintenance*).

Masalah atau persoalan dalam pemeliharaan meliputi: (1) persoalan teknis dan (2) persoalan ekonomis. Pada persoalan teknis yang perlu diperhatikan adalah tindakan apa yang harus dilakukan untuk memelihara atau merawat dan atau memperbaiki/mereparasi mesin atau peralatan yang rusak, serta alat-alat atau komponen apa saja yang harus dibutuhkan dan harus disediakan agar tindakan pada pekerjaan pemeliharaan atau merawat dan atau memperbaiki mesin atau peralatan yang rusak dapat dilakukan.

Pada persoalan teknis: apakah sebaiknya dilakukan *preventive maintenance* atau *corrective maintenance*, apakah sebaiknya peralatan yang rusak diperbaiki di dalam perusahaan atau di luar perusahaan, dan apakah sebaiknya peralatan atau mesin yang rusak diperbaiki atau diganti.

Jenis-jenis pemeliharaan yang dapat dilakukan oleh bagian *maintenance*, meliputi:

- a) Pemeliharaan bangunan
- b) Pemeliharaan peralatan bengkel
- c) Pemeliharaan peralatan elektronika
- d) Pemeliharaan untuk tenaga pembangkit
- e) Pemeliharaan penerangan dan ventilasi
- f) Pemeliharaan material *handling* dan pengangkutan
- g) Pemeliharaan halaman dan taman
- h) Pemeliharaan peralatan *service*
- i) Pemeliharaan peralatan gudang

Pemeliharaan peralatan diperlukan untuk mempertahankan efisiensi. Menjaga investasi, mempertahankan keandalan, dan mempertahankan umur ekonomis.

Khusus untuk pusat pembangkit listrik, bagian-bagian peralatan yang memerlukan pemeliharaan terutama adalah:

- a) Bagian-bagian yang bergeser, seperti: bantalan, cincin pengisap (*piston ring*), dan engsel-engsel.
- b) Bagian-bagian yang mempertemukan zat-zat dengan suhu yang berbeda, seperti: penukar panas (*heat exchanger*) *cran* ketel uap.
- c) Kontak-kontak listrik dalam sakelar serta klem-klem penyambung listrik.

Tugas kegiatan pemeliharaan meliputi:

- a) Inspeksi (*Inspection*)
- b) Kegiatan teknik (*engineering*)
- c) Kegiatan produksi (*production*)

- d) Kegiatan administrasi (*clerical work*)
- e) Pemeliharaan bangunan (*housekeeping*)

Pelaksanaan pemeliharaan fasilitas dan peralatan memerlukan:

- a) Berpedoman pada petunjuk peralatan atau mesin (*manual book*), meliputi:
  - Kegunaan dari mesin atau peralatan
  - Kapasitas mesin pada waktu atau umur tertentu
  - Cara memakai atau mengoperasikan mesin dan atau peralatan
  - Cara memelihara dan memperbaiki mesin dan atau peralatan
- b) Dengan berpedoman kepada buku petunjuk, meliputi:
  - Usaha-usaha yang harus dilakukan dalam pemakaian dan pemeliharaan mesin pada waktu mesin berumur tertentu
  - Penggunaan mesin dan atau peralatan harus sesuai dengan fungsi atau kegunaan
  - Cara-cara kegiatan teknis pemeliharaan dan perbaikan yang harus dilakukan pada mesin tersebut

Syarat-syarat yang diperlukan agar pekerjaan bagian pemeliharaan dapat efisien adalah:

- a) Harus ada data mengenai mesin dan peralatan yang dimiliki perusahaan.
- b) Harus ada perencanaan (*planning*) dan jadwal (*scheduling*).
- c) Harus ada surat tugas yang tertulis.
- d) Harus ada persediaan alat-alat/*sparepart*.
- e) Harus ada catatan.
- f) Harus ada laporan, pengawasan dan analisis.

Usaha-usaha untuk menjamin kelancaran kegiatan pemeliharaan adalah:

- a) Menambah jumlah peralatan para pekerja bagian pemeliharaan.
- b) Menggunakan suatu *preventive maintenance*.
- c) Diadakannya suatu cadangan di dalam suatu sistem produksi pada tingkat-tingkat yang kritis (*critical unit*).
- d) Usaha-usaha untuk menjadikan para pekerja pada bagian pemeliharaan sebagai suatu komponen dari mesin dan atau peralatan yang ada

## 7. Gangguan dan Kerusakan

Gangguan adalah peristiwa yang menyebabkan Pemutus Tenaga (PMT) membuka (*trip*) di luar kehendak operator sehingga terjadi pemutusan pasokan tenaga listrik. Gangguan sesungguhnya adalah peristiwa hubung singkat yang penyebabnya kebanyakan petir dan tanaman. Gangguan dapat juga disebabkan karena kerusakan alat, sebaliknya

gangguan yang disebabkan peti yang terjadi berkali-kali akhirnya dapat mengakibatkan alat (misalnya transformator) menjadi rusak.

### 8. Pengembangan Pembangkit

Pada umumnya, pusat listrik yang berdiri sendiri maupun yang ada dalam sistem interkoneksi memerlukan pengembangan. Hal ini disebabkan karena beban yang dihadapi terus bertambah, sedangkan di lain pihak unit pembangkit yang ada menjadi semakin tua dan perlu dikeluarkan dari operasi.

Jika gedung pusat listrik yang ada masih memungkinkan untuk penambahan unit pembangkit, maka pengembangan pembangkitan dapat dilakukan dengan menambah unit pembangkit dalam gedung pusat listrik yang telah ada tersebut. Tetapi jika tidak ada lagi kemungkinan memperluas gedung pusat listrik yang ada, maka harus dibangun pusat listrik yang baru. Pengembangan pembangkitan khususnya dalam sistem interkoneksi, selain harus memperhatikan masalah gangguan dan kerusakan juga harus memperhatikan masalah saluran transmisi dalam sistem.

### 9. Perkembangan Teknologi Pembangkitan

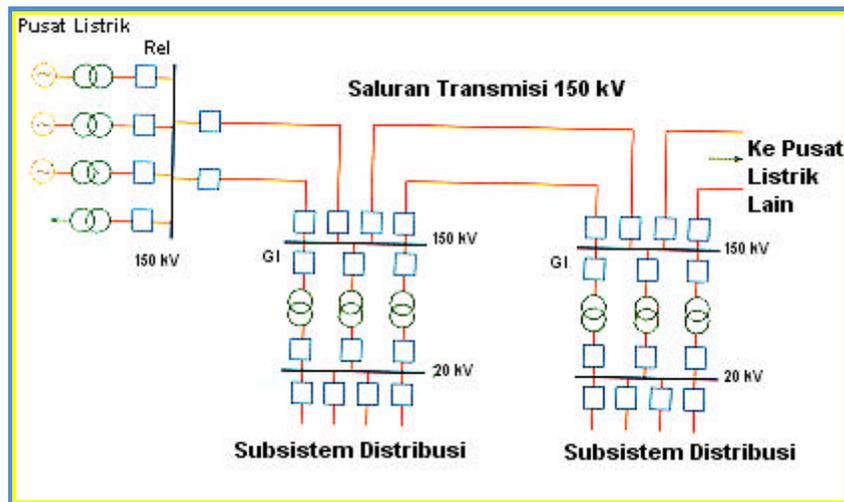
Perkembangan teknologi pembangkitan umumnya mengarah pada perbaikan efisiensi dan penerapan teknik konversi energi yang baru dan penurunan bahan bakar baru. Perkembangan ini meliputi segi perangkat keras (*hardware*) seperti komputerisasi dan juga perangkat lunak (*software*) seperti pengembangan model-model matematika untuk optimasi.

## E. Sistem Interkoneksi

Pusat listrik yang besar, di atas 100 MW umumnya beroperasi dalam sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi terdapat banyak pusat listrik dan banyak pusat beban (yang disebut gardu induk/GI) yang dihubungkan satu sama lain oleh saluran transmisi. Di setiap GI terdapat beban berupa jaringan distribusi yang melayani para konsumen tenaga listrik. Jaringan distribusi beserta konsumen ini merupakan suatu subsistem distribusi dan subsistem dari setiap GI umumnya tidak mempunyai hubungan listrik satu sama lain (interkoneksi).

Tujuan dari sistem interkoneksi antara lain adalah untuk menjaga kontinuitas penyediaan tenaga listrik karena apabila salah satu pusat pembangkit mengalami gangguan masih dapat disuplai dari pembangkit lain yang terhubung secara interkoneksi. Tujuan lainnya adalah saling memperingan beban yang harus ditanggung oleh suatu pusat listrik.

Gambar I.14 menunjukkan sebagian dari sistem interkoneksi yang terdiri dari sebuah pusat listrik, dua buah GI beserta subsistem distribusinya. Karena operasi pusat-pusat listrik dalam sistem interkoneksi saling mempengaruhi satu sama lain, maka perlu ada koordinasi operasi. Koordinasi operasi ini dilakukan oleh pusat pengatur beban.



Gambar I.14

Sebagian dari Sistem Interkoneksi (sebuah pusat pembangkit listrik, 2 buah GI dan subsistem distribusinya)

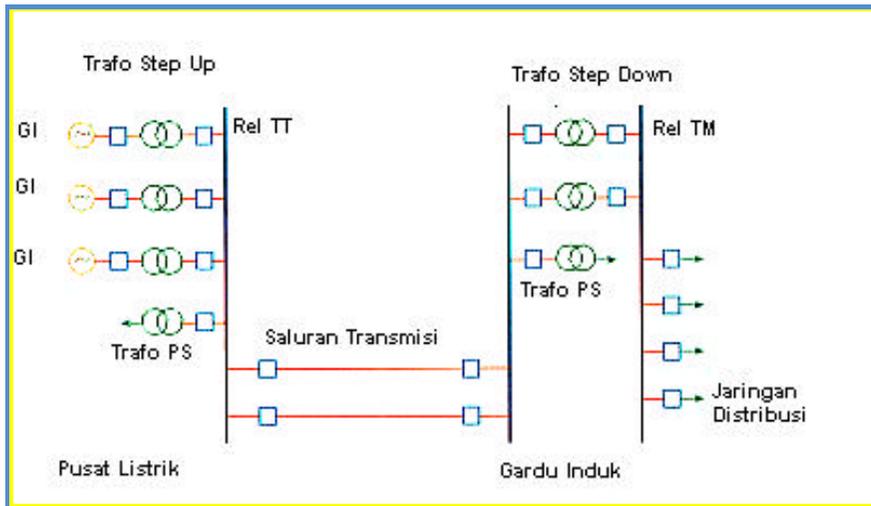
Koordinasi terutama meliputi:

- 1) Koordinasi dalam pemeliharaan.
- 2) Pembagian beban secara ekonomis.
- 3) Pengaturan frekuensi.
- 4) Pengaturan tegangan.
- 5) Prosedur mengatasi gangguan.

## F. Proses Penyaluran Tenaga Listrik

Setelah tenaga listrik dibangkitkan oleh suatu pusat pembangkit listrik, selanjutnya tenaga listrik disalurkan (ditransmisikan) melalui jaringan transmisi. Dari jaringan transmisi selanjutnya didistribusikan kepada para konsumen tenaga listrik melalui jaringan distribusi tenaga listrik.

Dalam pusat listrik, energi primer dikonversikan menjadi energi listrik. Kemudian energi listrik ini dinaikkan tegangannya untuk disalurkan melalui saluran transmisi. Tegangan transmisi yang digunakan PLN: 70 kV, 150kV, 275 kV, dan 500 kV. PT. Caltex Pacific Indonesia yang beroperasi di daerah Riau menggunakan tegangan transmisi 110 kV dan 230 kV Sedangkan PT. Inalum di Sumnatera Utara menggunakan tegangan transmisi 220 kV.



Gambar I.15

Proses Penyediaan Tenaga Listrik (Pembangkitan dan Penyaluran)

Keterangan:

- Trafo Step Up : Transformator untuk menaikkan tegangan listrik
- Trafo Step Down : Transformator untuk menurunkan tegangan listrik
- Trafo PS : Transformator untuk pemakaian sistem (sendiri)
- Rel TT : Rel tegangan tinggi
- Rel TM : Rel tegangan menengah

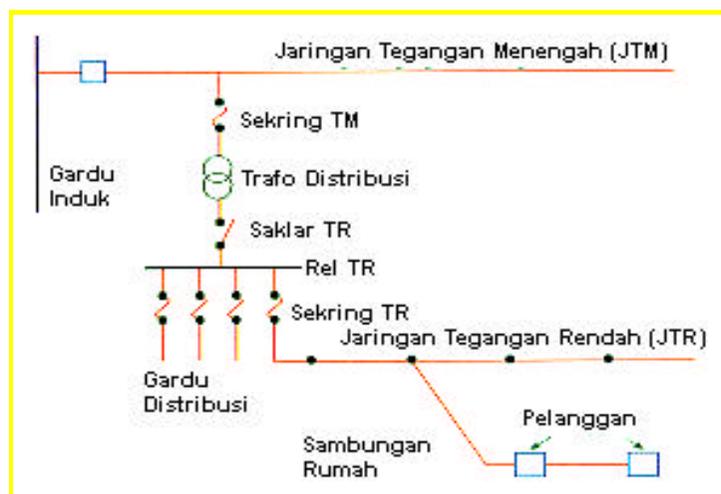
Saluran transmisi dapat berupa saluran kabel udara. atau saluran kabel tanah. PLN menggunakan frekuensi 50 Hz. Sedangkan PT. Caltex menggunakan frekuensi 60 Hz. Di gardu induk (GI), tegangan diturunkan menjadi tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang digunakan PLN adalah 20 kV. Sedangkan PT Caltex Pacific Indonesia menggunakan tegangan distribusi primer 13,8 kV.

Proses penyaluran tenaga listrik bagi konsumen ditunjukkan pada Gambar I.15 dan Gambar I.16.

Dari Gardu Induk (GI), tenaga listrik didistribusikan melalui penyulang-penyulang distribusi yang berupa saluran udara atau melalui saluran

kabel tanah. Pada penyulang-penyulang distribusi terdapat gardu-gardu distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah 380/220 Volt yang didistribusikan melalui jaringan tegangan rendah (JTR).

Konsumen tenaga listrik mendapat tenaga listrik dari JTR dengan menggunakan sambungan rumah (SR). Dari sambungan, tenaga listrik masuk ke alat pembatas dan pencatat tenaga listrik berupa KWH meter sebelum memasuki instalasi rumah milik konsumen. KWH meter berfungsi membatasi daya dan mencatat besarnya pemakaian energi listrik oleh konsumen.



Gambar I.16

Proses Penyediaan Tenaga Listrik bagi Konsumen

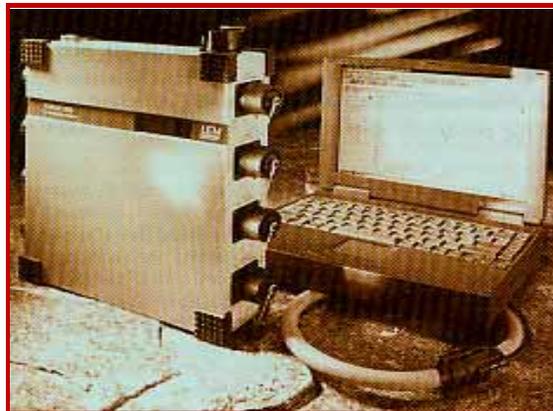
## G. Mutu Tenaga Listrik

Mutu tenaga listrik sangat diperlukan dalam kaitannya dengan kualitas penyediaan tenaga listrik dan pelayanan. Pertumbuhan pemakaian tenaga listrik makin lama makin meningkat dalam kehidupan sehari-hari, khususnya bagi keperluan industri, maka mutu tenaga listrik harus juga semakin meningkat dan menjadi tuntutan yang makin besar dari pihak pemakai tenaga listrik.

Untuk merekam kualitas tenaga listrik yang dihasilkan oleh pusat-pusat listrik digunakan alat *Power Network Analyzer Type (TOPAS) 1000* buatan LEM Belgia. Gambar I.16 menunjukkan *Power Network Analyzer Type TOPAS 1000* buatan LEM Belgia.

Mutu tenaga listrik yang dihasilkan pusat listrik, indikatornya antara lain adalah:

1. Kontinuitas penyediaan, apakah tersedia 24 jam sehari sepanjang tahun.
2. Nilai tegangan, apakah selalu ada dalam batas-batas yang diijinkan.
3. Nilai frekuensi, apakah selalu ada dalam batas-batas yang diijinkan.
4. Kedip tegangan, apakah besarnya dan lamanya masih dapat diterima oleh pemakai tenaga listrik.
5. Kandungan harmonisa, apakah jumlahnya masih dalam batas-batas yang dapat diterima oleh pemakai tenaga listrik.



Gambar I.17  
*Power Network Analyzer* tipe TOPAS 1000  
buatan LEM Belgia.

Kelima indikator dapat direkam, jika ada permasalahan yang tidak sesuai, dapat dibahas secara kuantitatif antara pihak penyedia dan pemakai tenaga listrik, alat tersebut mampu melakukan perekaman pada:

- a) Arus dari tegangan dalam keadaan normal maupun transien.
- b) Harmonisa yang terkandung dalam tegangan.
- c) Kedip tegangan, variasi tegangan, dan kemiringan tegangan.
- d) Frekuensi.

#### H. Latihan

1. Sebutkan 4 faktor yang harus dipertimbangkan dalam pengembangan pusat tenaga listrik. Jawaban disertai penjelasan
2. Sebutkan 5 indikator mutu tenaga listrik, disertai penjelasan

#### I. Tugas

Dalam kurun waktu 1 tahun terakhir, berapa kali terjadi mati lampu di sekitar wilayah rumahmu dan faktor apa penyebabnya. Diskusikan jawabanmu dengan didampingi guru.

## BAB II

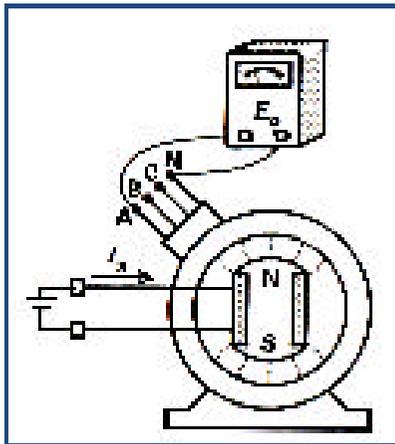
# INSTALASI LISTRIK PADA PUSAT PEMBANGKIT LISTRIK

### A. Instalasi Listrik Generator Sinkron 3 phasa

Generator listrik yang banyak digunakan dalam pusat pembangkit listrik adalah generator sinkron 3 phasa.

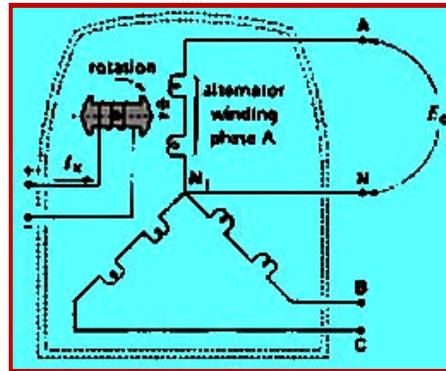
#### 1. Instalasi klem generator sinkron 3 phasa

Pemberian kode pada klem untuk generator sinkron 3 phasa ada yang A, B, C dan N untuk hubungan bintang seperti ditunjukkan pada Gambar II.1. Rangkaian listrik generator sinkron 3 phasa ditunjukkan pada Gambar II.2.



Gambar II.1  
Generator sinkron 3 phasa

Sistem penotasian yang lain juga ada, yaitu ujung-ujung pada belitan stator dari generator sinkron 3 phasa dihubungkan pada klem generator sehingga ada 6 (enam) klem. Klem-klem diberi kode atau notasi R S T dan U V W, serta ada juga yang memberi kode U, V, W dan Z, X, Y.

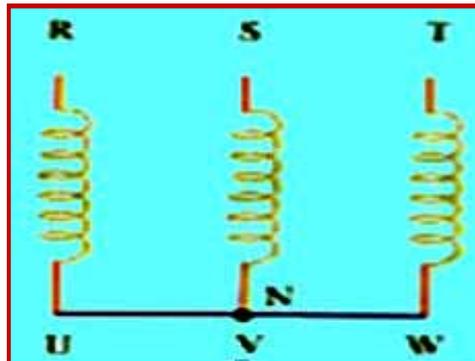


Gambar II.2

Rangkaian listrik generator sinkron 3 fase hubungan Y

Klem R dan U merupakan ujung-ujung kumparan atau belitan fase pertama, klem S dan V ujung-ujung kumparan fase ke-2, dan kumparan ke-3 adalah T dan W. Karena umumnya generator sinkron dihubungkan dalam hubungan Y (*star/bintang*), maka ketiga klem U, V, dan W dihubungkan jadi satu sebagai titik netral.

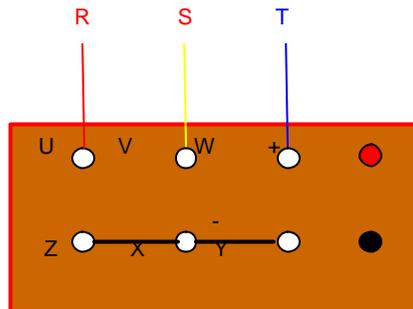
Gambar II.3 menunjukkan ujung kumparan stator generator sinkron 3 fase hubungan bintang



Gambar II.3

Kumparan stator generator sinkron 3 fase hubungan Y

Untuk hubungan klem pada generator sinkron 3 fase hubungan bintang ditunjukkan pada Gambar II.4. Tanda + dan - menunjukkan klem untuk arus penguatan generator sinkron 3 fase dari luar arus searah (DC), atau dari generator sendiri yang disearahkan terlebih dahulu memakai penyearah.



Gambar II.4

Hubungan klem generator sinkron 3 fase hubungan Y

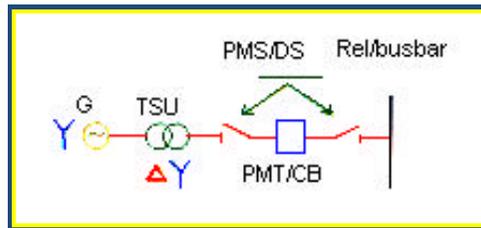
## 2. Instalasi listrik generator sinkron dan transformator 3 fase

Tegangan generator sinkron pada ini maksimum 23 kV, dan untuk tegangan generator sinkron yang lebih tinggi masih dalam uji coba. Generator-generator sinkron 3 fase daya di atas 10 MVA memiliki transformator penaik tegangan dalam satu kesatuan dengan generatornya. Secara diagram hubungan generator sinkron dan transformator 3 fase ditunjukkan pada Gambar II.5.

Transformator tegangan umumnya mempunyai hubungan segitiga/delta-bintang ( $\Delta$ -Y). Energi listrik yang dibangkitkan generator setelah dinaikkan oleh transformator penaik tegangan disalurkan melalui pemutus tenaga (PMT) atau transformator pemisah (*disconnecting Switch/DS*) ke rel (*busbar*).

Penyaluran daya dari generator sinkron 3 fase sampai ke transformator penaik tegangan menggunakan kabel yang diletakkan pada saluran tanah dan saluran di atas tanah (*cable duct*). Setelah keluar dari sisi tegangan tinggi transformator sebagai penaik tegangan, tenaga disalurkan melalui konduktor tanpa isolasi ke PMT dan dari PMT ke rel menggunakan konduktor tanpa isolasi juga. Pada rel (*busbar*) umumnya berupa konduktor tanpa isolasi.

Saluran tenaga listrik dari generator sampai dengan rel harus rapi dan bersih agar tidak menimbulkan gangguan, karena gangguan pada bagian ini akan menimbulkan arus hubung singkat yang relatif besar dan mempunyai resiko terganggunya pasokan tenaga listrik dari pusat listrik ke sistem, bahkan apabila generator yang digunakan pada sistem berkapasitas besar kemungkinan seluruh sistem menjadi terganggu.



Gambar II.5

Diagram hubungan generator dan transformator 3 fase

Keterangan:

G : Generator

TSU : Transformator untuk penaik tegangan

PMS : Transformator pemisah (*disconnecting switch/DS*)

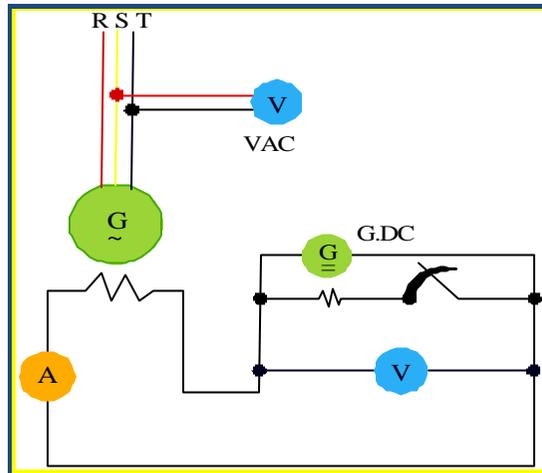
PMT : Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker/CB*)

### 3. Instalasi *excitacy* (*excitacy*) generator sinkron 3 fase

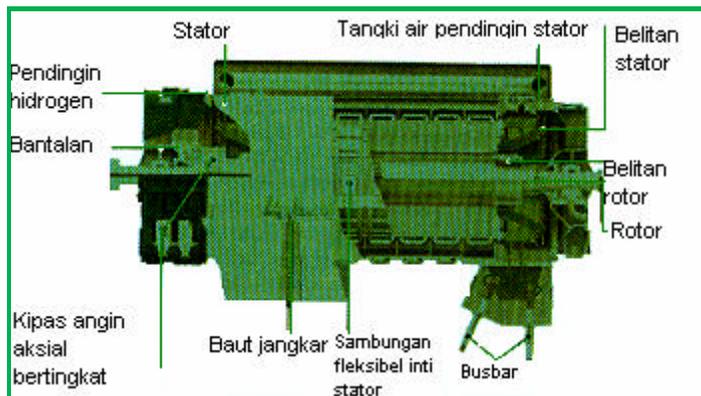
Bagian lain dari instalasi listrik pada generator sinkron 3 fase adalah instalasi arus penguat medan magnet (*excitacy*). Arus penguat didapat medan magnet secara umum diperoleh dari generator arus searah (DC) yang terpasang satu poros dengan generator utama.

Selain itu ada juga penguatan yang diperoleh dari generator sinkron yang disearahkan terlebih dahulu, dan bahkan ada generator sinkron yang sistem *excitacy*-nya berasal dari belitan penguat yang dipasang pada rotor generator sinkron sendiri.

Secara prinsip penguatan generator sinkron 3 phase ditunjukkan pada Gambar II.6.



Gambar II.6  
Prinsip penguatan pada generator sinkron 3 phase



Gambar II.7  
Generator sebuah PLTU buatan Siemen dengan 2 kutub

Hubungan listrik antara generator utama dengan generator arus penguat dilakukan melalui cincin geser dan pengatur tegangan otomatis.

Pengatur tegangan otomatis berfungsi mengatur besarnya arus penguat medan magnet agar besarnya tegangan generator utama dapat dijaga konstan.

Pada generator yang memiliki daya di atas 100 MVA, untuk sistem penguatan banyak digunakan generator DC sebagai penguat secara bertingkat. Ada generator penguat pilot (*pilot exciter*) dan generator penguat utama (*main exciter*). Gambar II.7 menunjukkan generator sebuah PLTU buatan Siemen dengan 2 kutub.

Penguat generator utama cenderung berkembang dari generator arus bolak-balik yang dihubungkan ke generator sinkron melalui penyearah yang berputar di poros generator sehingga tidak diperlukan cincin geser.

Gambar II.8 menunjukkan potongan memanjang rotor generator sinkron berkutub dua (*rotor turbo generator*) berkutub dua dan Gambar II.9 menunjukkan Rotor generator PLTA Kota Panjang (Riau) berkutub banyak 57 MW.

PLTU dan PLTG memerlukan putaran tinggi, umumnya menggunakan generator berkutub dua dan PLTA memerlukan putaran rendah menggunakan generator berkutub banyak.



Gambar II.8  
Rotor turbo generator berkutub dua



Gambar II.9  
Rotor generator PLTA Kota Panjang (Riau)  
berkutub banyak 57 MW

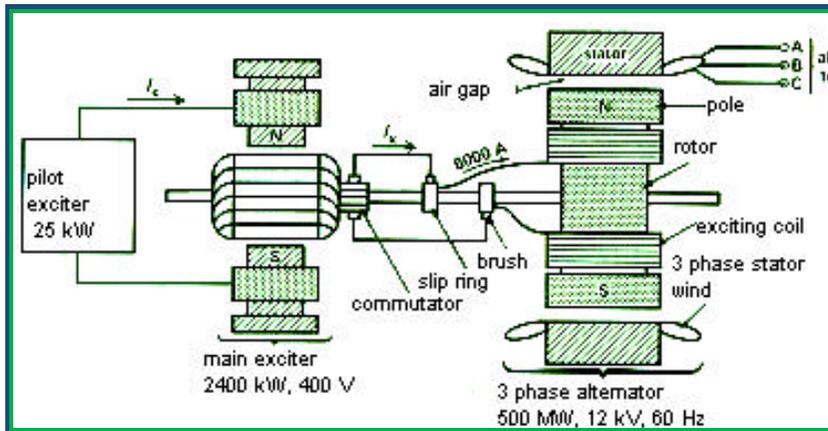


Gambar II.10  
Stator dari generator sinkron

Titik netral generator tidak ditanahkan dan jika ditanahkan umumnya pemasangannya melalui impedansi untuk membatasi besarnya arus gangguan hubung tanah agar cukup mampu untuk menggerakkan relai proteksi.

Gambar II.11 menunjukkan diagram generator sinkron dengan arus penguatan dari generator DC 2400 kW/400V. Dari komutator Generator

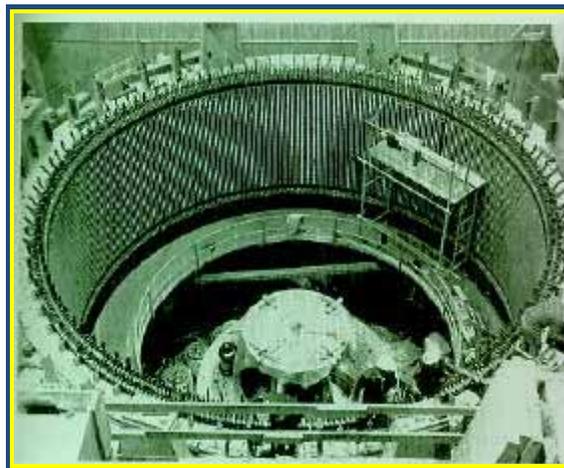
DC dihubungkan pada 2 (dua) slipring generator utama. Generator utama memiliki kapasitas 500 MW/12 kV/60Hz.



Gambar II.11

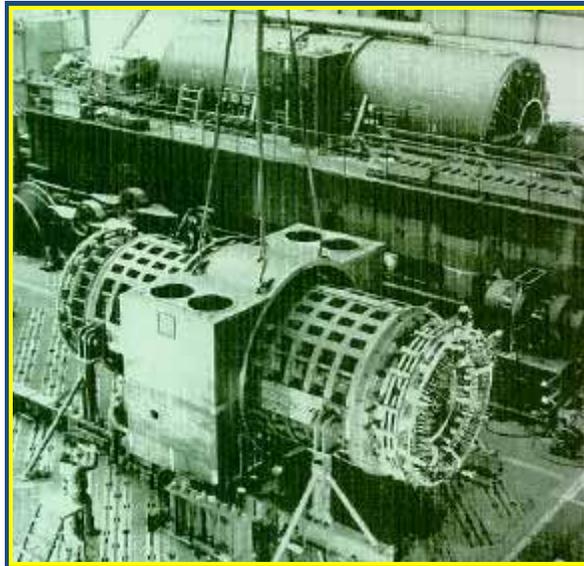
Diagram generator sinkron 500 MW dengan penguat generator DC 2400 kW

Gambar II.12 menunjukkan contoh stator generator sinkron 3 fase 500 MVA, 15 kV dan 200 rpm dengan jumlah alur atau *slot* 378



Gambar II.12

Stator generator sinkron 3 fase 500 MVA, 15 kV, 200 rpm, 378 *slots* (alur)



Gambar II.13

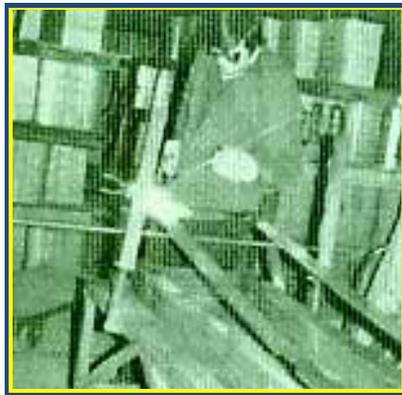
Stator *steam turbine generator* sinkron 722 MVA 3600 rpm 19kV

Gambar II.14 menunjukkan rotor generator dengan 36 kutub, arus penguatan 2400 A DC dari hasil penyearahan tegangan listrik 330 Volt AC.



Gambar II.14

Rotor generator 36 kutub, penguatan 2400 A DC hasil penyearahan listrik 330 Volt AC

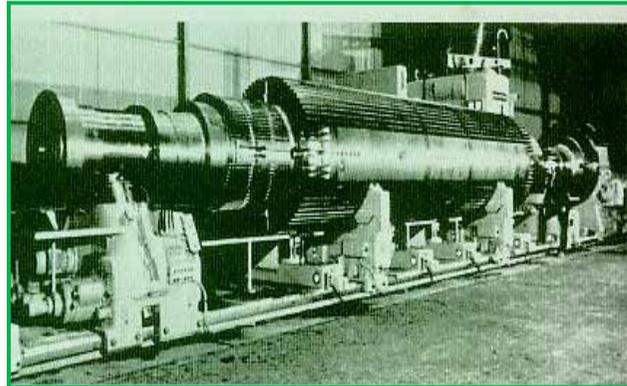


Gambar II.15  
Belitan rotor *salient-pole* (kutub menonjol)  
generator sinkron 250 MVA

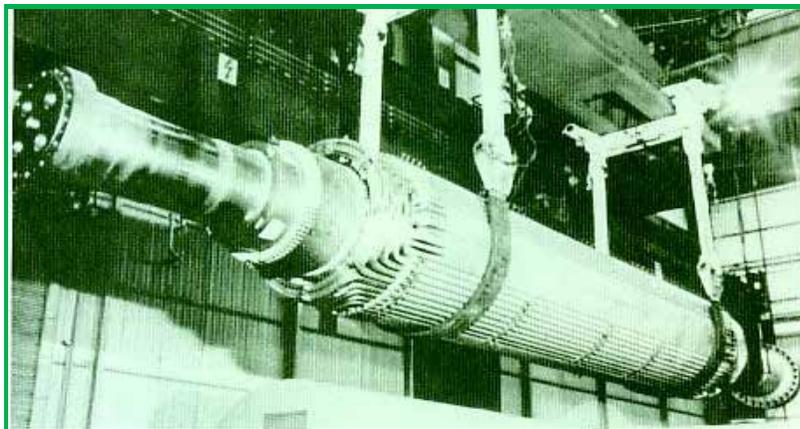
Gambar II.16 menunjukkan generator sinkron rotor sangkar kutub menonjol 12 *slot* dan Gambar II.17 menunjukkan rotor 3 *phase steam-turbine* generator 1530 MVA, 1500 rpm, 27 kV, 50 Hz.



Gambar II.16  
Generator sinkron rotor sangkar  
kutub menonjol 12 slots



Gambar II.17  
Rotor 3 *phasa steam-turbine* generator  
1530 MVA, 1500 rpm, 27 kV, 50 Hz



Gambar II.18  
Rotor belit 4 kutub, penguatan 11,2 kA  
600V DC *brushless*



a. Peralatan pendukung sistem *excitacy*

1) *Pilot exciter*

Merupakan penguat pada generator utama adalah penguat dalam atau penguat sendiri dengan jenis kumparan kompon panjang generator DC,

Pemberi penguatan pertama pada *main exciter*.

Magnetnya berasal dari remanent magnet (sisa-sisa magnet) buatan

2) *Juster Werstand*

Tahanan geser yang berfungsi untuk mengatur tegangan *output pilot exciter* agar pada putaran nominal (1.500 rpm) mencapai 110 volt DC

3) *Shunt regelar*

Tahanan *shunt* untuk mengatur tegangan output AVR sebelum unit paralel.

4) AVR

Sebagai pengendali agar tegangan output generator selalu stabil/ konstan dengan beban yang bervariasi

5) V V A

Sebuah kontak penguatan

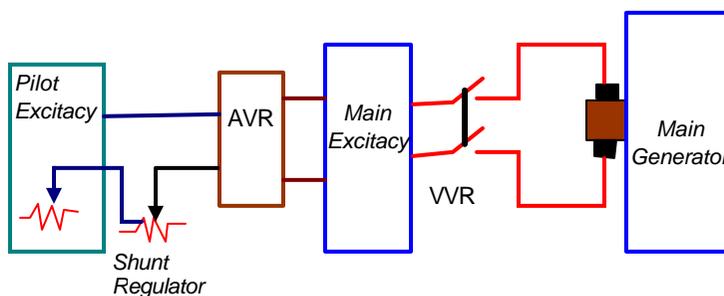
6) *Main Exciter*

Sebagai penguat utama bagi generator setelah terlebih dahulu mendapat arus penguatan dari *pilot exciter*.

7) CT/ PPT AVR

Sebagai pengukur arus dan tegangan output dari generator yang selanjutnya sebagai input bagi AVR bila unit sudah paralel atau sinkron.

b. Sistem penguatan generator unit I PLTA Mendalan

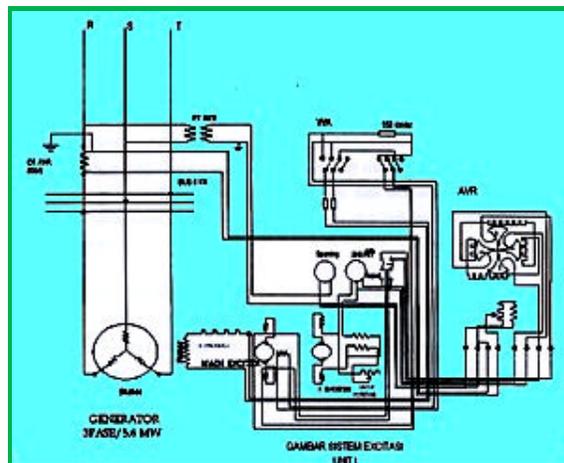


Gambar II.20.

Penguatan generator unit I PLTA Mendalan

Pada putaran normal turbin-generator, *pilot exciter* yang merupakan generator arus searah penguat dalam (kompon panjang) menghasilkan tegangan dan arus yang dapat diatur oleh tahanan lihat Gambar II.21.

Tegangan dan arus searah tersebut pada awalnya dibangkitkan oleh fluks residu (yang tersimpan pada belitan kompon *stator pilot exciter*) dengan penambahan tingkat kecepatan akan menghasilkan arus-tegangan sampai dengan titik kritis pada putaran tertentu.



Gambar II.21.

Gambar pengawatan sistem penguatan generator unit I PLTA di daerah Mendalan Sumber (PLTA Mendalan)

Tegangan-arus yang dihasilkan oleh *pilot exciter* merupakan tegangan penguatan untuk generator main exciter, *generator main exciter* adalah *generator arus searah shunt* dengan penguatan terpisah.

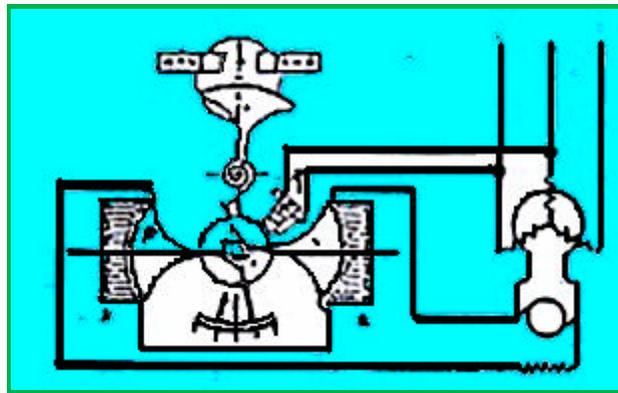
Penguatan pada generator utama disuplai oleh *main exciter* melalui saklar penguat medan. Pada awal pengoperasian unit pembangkit, setelah turbin-generator pada putaran nominal (750 Rpm) pengisian tegangan main generator dilakukan dengan memutar penuh *hand wheel (shunt regullar)* searah jarum jam (menurunkan harga resistansi sampai dengan batas minimum) yang sebelumnya memasukkan saklar penguat medan (VVA).

Pada tegangan output generator  $\pm 6$  KV, selanjutnya memutar *voltage regullar* dengan arah yang sama dengan *shunt regullar* sampai dengan

arah yang sama dengan *shunt regular* sampai dengan output generator menunjuk 6 KV.

Pada output tegangan generator tersebut merupakan langkah awal untuk persiapan paralel unit dengan jaring-jaring secara manual.

c. Pengaturan tegangan otomatis Generator sinkron 3 fase  
Pengaturan Tegangan Otomatis Generator sinkron 3 fase menggunakan Tipe Elektro Mekanik AVR Brown & Cie ( AVR - BBC ).

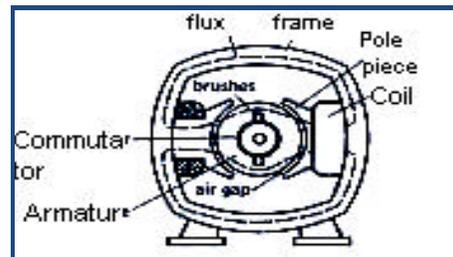


Gambar II.22  
Prinsip kerja AVR Brown & Cie

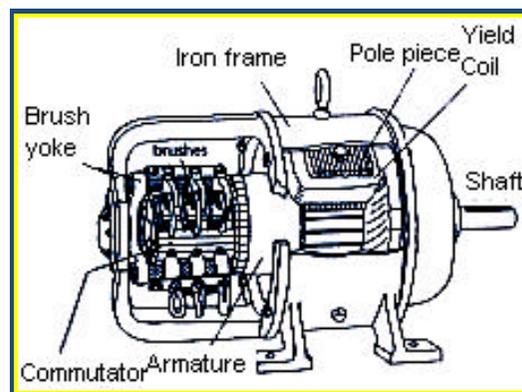
Di PLTA Mendalan Pengaturan tegangan otomatis (AVR) menggunakan tipe elektro mekanik AVR Brown & Cie. AVR ini terdiri dari dua sektor hambatan P yang diperlengkapi alur kontak bentuk lingkaran. Kontak-kontak ini dapat berputar maju dan mundur, sehingga hambatan R dapat diperbesar dan diperkecil.

Jika tegangan generator naik, maka kopel yang dibangkitkan oleh tromol T menjadi kuat, sehingga P bergerak kekanan dan akibatnya hambatan diperbesar. *Dinamo exciter* penguatannya diperkecil, sehingga tegangan generator turun ke normal. Bila tegangan generator turun (kurang dari normal), maka terjadi proses sebaliknya.

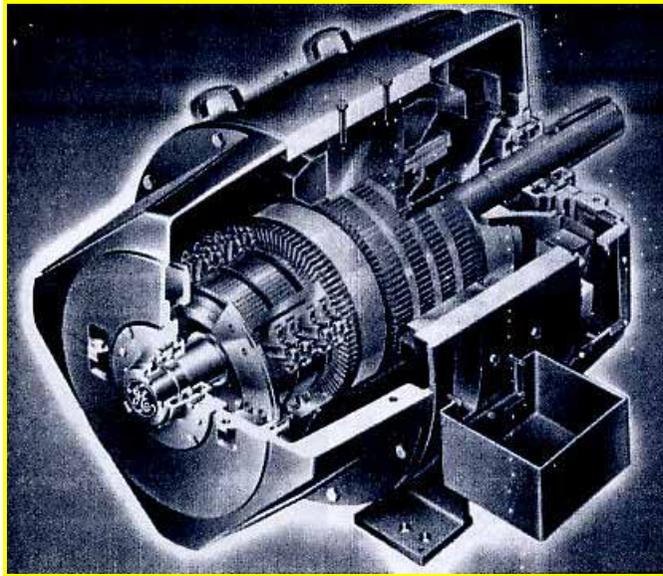
Contoh jenis motor DC ditunjukkan pada Gambar II.23 dan II.24.



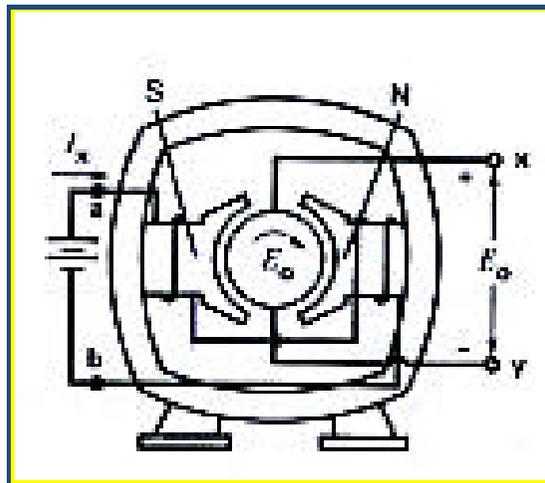
Gambar II.23  
Bagian-bagian generator DC dengan 2 kutub



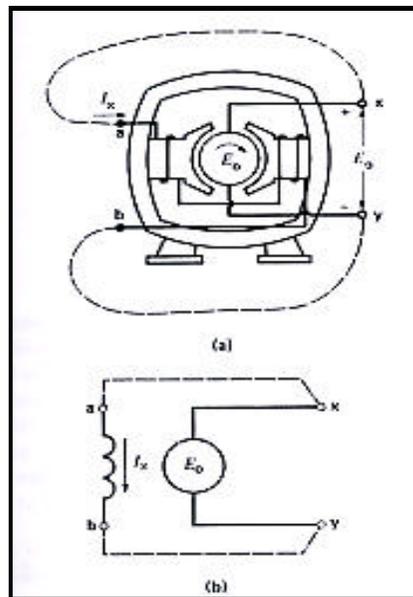
Gambar II.24  
Generator DC shunt 4 kutub



Gambar II.25  
 Bagian-bagian generator DC 100 kW, 250V, 4 kutub, 1275 rpm (Courtesy of  
 General Electric Company USA)

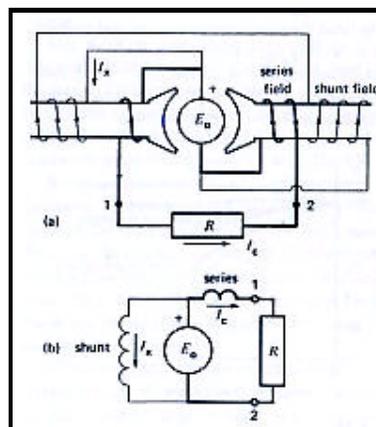


Gambar II.26  
 Generator DC 2 kutub dengan Penguatan tersendiri



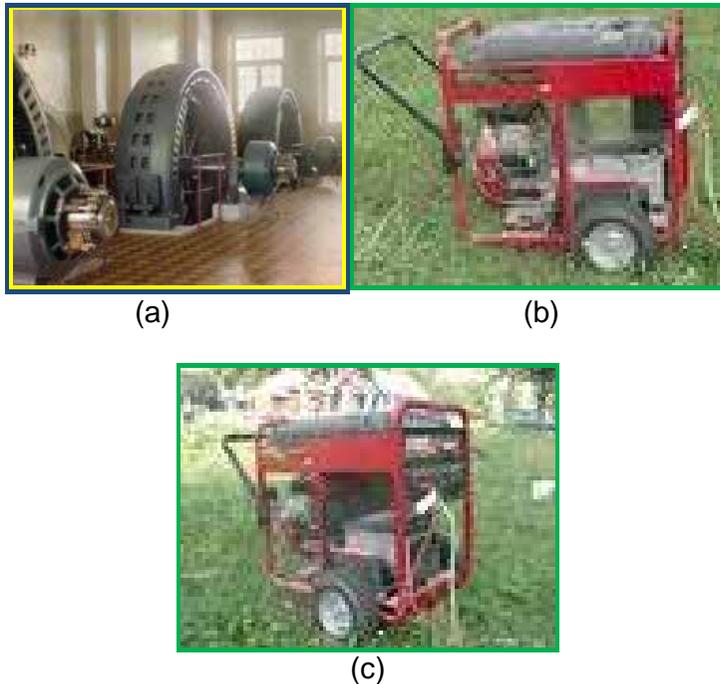
Gambar II.27

- (a) Generator shunt dengan penguatan sendiri  
 (b) Diagram skema generator shunt



Gambar II.28

- (a) Generator kompon panjang berbeban  
 (b) Skema diagram generator kompon



Gambar II.29  
(a) Generator abad 20 awal  
(b) Generator *portabel* (pandangan samping)  
(c) Generator *portabel* (pandangan sudut)

## B. Rel (*Busbar*)

Semua generator sinkron pada pusat pembangkit listrik menyalurkan tenaga listrik ke rel pusat listrik. Demikian pula semua saluran yang mengambil maupun yang mengirim tenaga listrik dihubungkan ke rel ini.

### 1. Rel tunggal pada pusat pembangkit

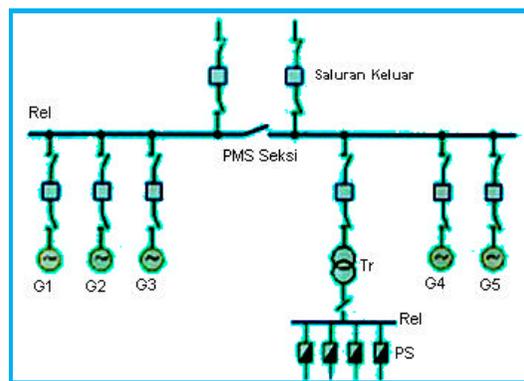
Rel tunggal adalah susunan rel yang sederhana dan relatif paling murah, tetapi memiliki kelemahan dalam hal keandalan, dan kontinuitas pelayanan serta kurang fleksibel dalam pengoperasiannya.

Jika terjadi kerusakan pada rel, seluruh pusat listrik harus dipadamkan jika akan melakukan perbaikan. Rel tunggal paling baik jika digunakan hanya pada pusat pembangkit listrik yang tidak begitu penting peranannya dalam sistem.

Untuk meningkatkan tingkat keandalan rel tunggal, PMS seksi dapat dipasang dan membagi rel menjadi 2 kelompok dan kanan dari rel tunggal tersebut.

Unit pembangkit dan beban sebagian dihubungkan di kelompok kiri dan sebagian lagi dihubungkan di kelompok kanan. Jika terjadi kerusakan pada rel yang perbaikannya memerlukan pemadaman, maka seksi rel yang memerlukan perbaikan dapat diputus dengan cara membuka PMS seksi sehingga seksi rel yang sebelahnyanya tetap dapat dinyalakan atau dioperasikan.

Gambar II.30 menunjukkan Pusat pembangkit listrik dengan rel tunggal menggunakan PMS seksi.



Gambar II.30

Pusat pembangkit listrik dengan rel tunggal menggunakan PMS seksi

**Keterangan**

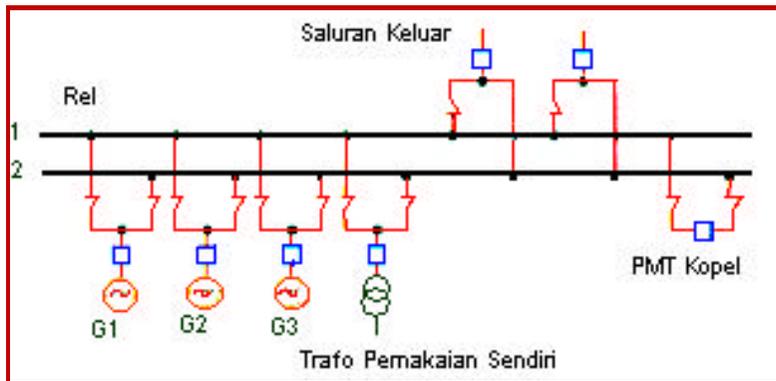
- Tr : transformator
- PMS Seksi : saklar pemisah
- G : Generator
- PS : pemakaian sendiri (pemakaian sistem)

## 2. Rel Ganda dengan Satu PMT

Pusat pembangkit listrik rel ganda dengan PMT tunggal ditunjukkan pada Gambar II.31. Hubungan ke rel 1 atau rel 2 dilakukan melalui PMS. Rel ganda umumnya dilengkapi dengan PMT beserta PMS-nya yang berfungsi menghubungkan rel 1 dan rel 2.

Dengan rel ganda, sebagian instalasi dapat dihubungkan ke rel 1 dan sebagian lagi ke rel 2. Kedua rel tersebut (rel 1 dan rel 2) dapat dihubungkan paralel atau terpisah dengan cara menutup atau membuka PMT Kopel.

Dengan cara ini fleksibilitas pengoperasian bertambah terutama sewaktu menghadapi gangguan yang terjadi dalam sistem.



Gambar II.31

Pusat pembangkit listrik dengan rel ganda menggunakan PMT tunggal

Sebagian dari unit pembangkit atau beban dapat dihubungkan ke rel 1 dan lainnya ke rel 2. Apabila salah satu unit pembangkit atau salah satu beban akan dipindah rel, terlebih dahulu PMT-nya harus dibuka, selanjutnya disusul pembukaan PMS rel yang akan dilepas, baru memasukkan PMS rel yang dituju, urutannya tidak boleh dibalik. Apabila terbalik, maka akan terjadi hubungan paralel antara rel 1 dan rel 2 yang belum tentu sama tegangannya dan berbahaya. Setelah selesai melakukan pemindahan posisi PMS, PMT dimasukkan. Untuk unit pembangkit, pemasukan PMT harus melalui proses sinkronisasi.

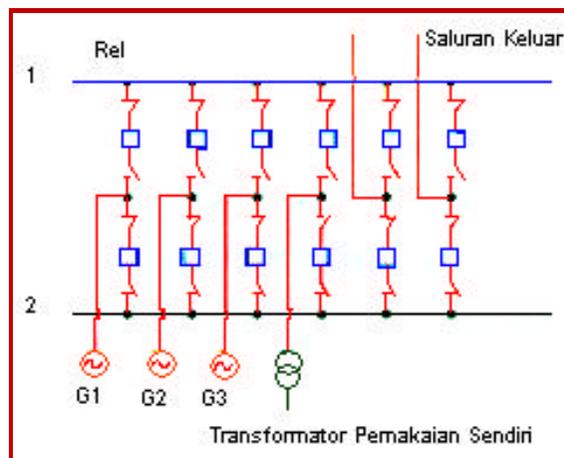
Proses pemindahan beban dari rel satu ke rel lainnya memerlukan pemadaman, yaitu saat PMT dibuka. Pemindahan beban atau unit pembangkit dari salah satu rel ke rel lainnya dalam prakteknya dapat terjadi, misalnya karena ada kerusakan yang memerlukan pemadaman rel pada saat perbaikan.

### 3. Pusat pembangkit listrik dengan dua PMT

Rel ganda dengan dua PMT sama seperti rel ganda dengan satu PMT, tetapi semua unsur dapat dihubungkan ke rel 1 atau rel 2 atau duaduanya melalui PMT sehingga fleksibilitasnya lebih baik tinggi. Pusat pembangkit listrik dengan rel ganda menggunakan dua PMT (PMT Ganda) ditunjukkan pada Gambar II.32.

Pemindahan beban dari rel 1 ke rel 2 dapat dilakukan tanpa pemadaman, karena dengan adanya 2 buah PMT (masing-masing satu PMT untuk setiap rel) pemindahan beban dilakukan dengan menutup rel yang dituju, kemudian membuka PMT rel yang dilepas. Rel 1 dan rel 2

tegangannya sama, baik besarnya maupun phasanya, setelah itu PMT harus masuk.



Gambar II.32

Pusat pembangkit listrik dengan rel ganda menggunakan dua PMT (PMT Ganda)

#### 4. Rel dengan PMT 1½

Rel dengan PMT 1½ adalah rel ganda dengan 3 buah PMT di antara dua rel. Jika rel-rel diberi identifikasi sebagai rel A dan rel B, maka PMT yang dekat dengan rel A diberi identifikasi sebagai PMT A<sub>1</sub>, PMT A<sub>2</sub>, dan seterusnya.

PMT yang dekat rel B diberi identifikasi sebagai PMT B<sub>1</sub>, PMT B<sub>2</sub>, dan seterusnya. PMT yang di tengah disebut PMT diameter dan diberi identifikasi sebagai PMT AB<sub>1</sub>, PMT AB<sub>2</sub>, dan seterusnya.

Bagian-bagian dari instalasi dihubungkan pada titik-titik yang letaknya antara PMT A dengan PMT B dan pada titik-titik yang letaknya antara PMT B dengan PMT AB seperti ditunjukkan pada Gambar II.33.

Dibandingkan dengan rel-rel sebelumnya, rel dengan PMT 1½ ini memiliki keandalan paling tinggi.

Jika rel A mengalami gangguan, dengan membuka semua PMT bernomor A beserta PMS-nya, daya tetap dapat disalurkan secara penuh. Jika rel B mengalami gangguan, dengan membuka semua PMT bernomor B beserta PMS-nya, daya tetap dapat disalurkan secara penuh.



### C. Saluran Kabel antara Generator Sinkron 3 Fasa dan Rel

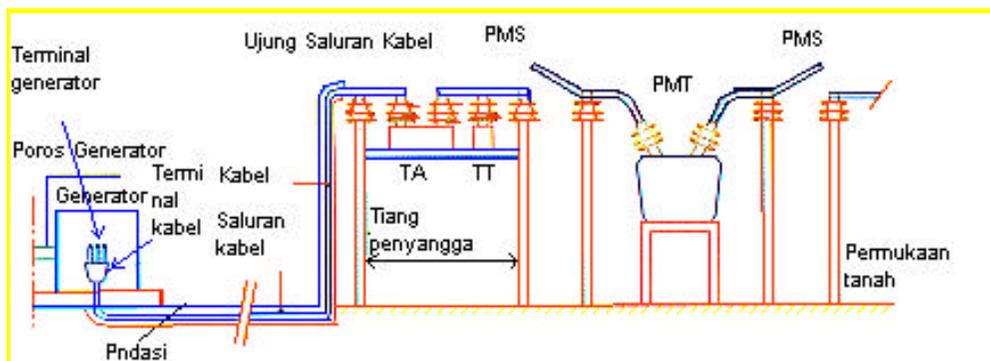
1. Perlindungan saluran kabel antara generator dan rel dilakukan menggunakan kabel yang diletakkan pada saluran khusus dalam tanah dan jika berada di atas tanah diletakkan pada rak penyangga kabel yang melindungi kabel secara mekanis. Perlindungan mekanis tersebut untuk mencegah kerusakan kabel dan dapat menimbulkan gangguan. Gangguan pada kabel antara generator dengan rel dapat merusak generator.

Kerusakan pada generator tidak dikehendaki karena memerlukan biaya perbaikan mahal dan waktu perbaikannya lama sehingga dapat menimbulkan pemadaman pasokan daya listrik.

2. Cara memasang kabel saluran  
Antara generator pembangkit dengan rel terdapat transformator arus dan transformator tegangan untuk keperluan pengukuran dan proteksi.

Gambar II.34 menunjukkan saluran antara generator dan rel menggunakan kabel

Setelah melalui transformator arus dan transformator tegangan, kabel dihubungkan ke saklar tanpa pemutus tenaga (PMT) dan saklar pemisah (PMS) sebelum dihubungkan ke rel.



Gambar II.34  
Saluran antara generator dan rel

Keterangan:

TA : Transformator Arus

TT : Transformator Tegangan

PMS : Saklar Pemisah/*Disconnecting Switch* (DS)

PMT : Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*)

Kabel yang digunakan adalah kabel 1 fasa berjumlah 3 buah kabel. Tujuannya memudahkan pemasangan, terutama adanya transformator arus dan transformator tegangan serta memudahkan dalam perbaikan jika terjadi kerusakan pada kabel tersebut.

Titik netral dari generator dihubungkan membentuk hubungan bintang. Untuk generator kecil dengan kapasitas di bawah 5 MVA, titik netral generator tidak ditanahkan.

Untuk generator yang lebih dari 5 MVA, dianjurkan melakukan pentanahan titik netral generator melewati tahanan, kumpulan, atau transformator kecil (transformator distribusi) untuk proteksi.

Dalam melakukan pentanahan, digunakan kabel serupa dengan kabel yang menghubungkan generator dengan rel. Dalam prakteknya, khusus generator besar (di atas 10 MVA) dilakukan pencabangan untuk memberi daya ke transformator pemakaian sendiri.

Pencabangan pada saluran antara generator dan rel harus dihindari dan jika sangat diperlukan pelaksanaannya, dengan membuat rel kecil dalam ruang khusus dan sebaiknya dihindari karena akan menimbulkan arus gangguan yang besar karena letaknya dekat dengan generator dan dapat menimbulkan kerusakan fatal karena generator tidak dapat berproduksi.

## D. Jenis-jenis Saklar Tenaga

### 1. Fungsi saklar

Saklar berfungsi memutus dan menyambung rangkaian listrik. Semakin tinggi tegangan sistem yang disambung dan diputus pada sistem, semakin sulit proses pemutusan rangkaian listrik yang dihadapi karena semakin tinggi tegangan maka semakin tinggi tegangan transien pada saat pemutusan pada rangkaian. Tegangan transien dapat memunculkan kembali arus listrik yang telah diputus.

Konstruksi saklar harus memperhitungkan sifat rangkaian, semakin kapasitif rangkaian listrik yang diputus, semakin besar terjadinya penyalaan kembali karena rangkaian kapasitif memiliki kemampuan menyimpan muatan listrik yang besar dan dapat timbul kembali sewaktu rangkaian diputus.

Pada saat rangkaian listrik diputus, kontak-kontak saklar timbul busur listrik. Busur listrik menyebabkan material kontak saklar teroksidasi sehingga daya hantarnya berkurang pada saat kontak-kontak saklar menutup kembali.

Untuk mengurangi pengaruh hasil oksidasi, gerakan kontak-kontak saklar harus bersifat membersihkan dirinya sendiri.

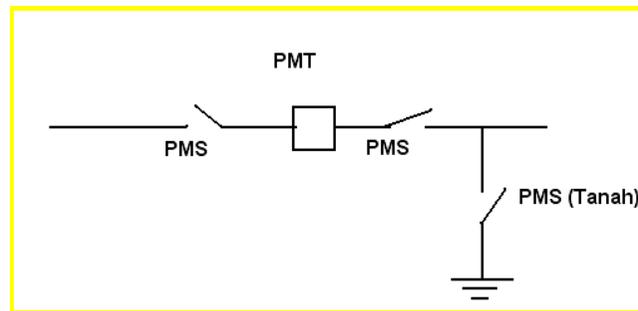
## 2. Jenis saklar

Saklar untuk keperluan rangkaian listrik dengan tegangan di atas 1,5 kV dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu:

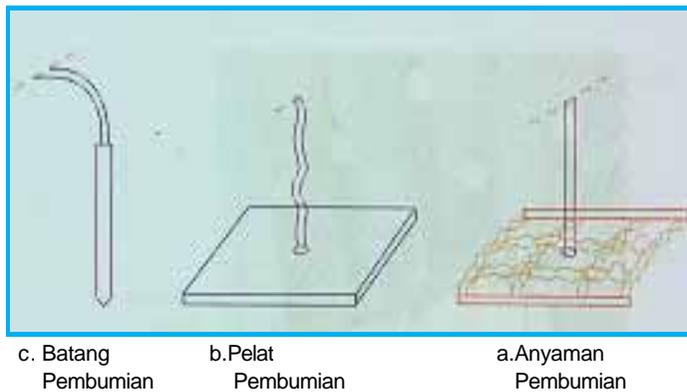
- a. Saklar pemutus tenaga (PMT)  
Pemutus tenaga (PMT) adalah saklar yang mampu memutus arus gangguan hubung singkat Saklar pemutus tenaga dalam bahasa Inggris disebut *circuit breaker* (CB).
- b. Pemutus Beban (PMB)  
Pemutus beban atau *load break switch* (LBS), adalah saklar yang hanya mampu memutus arus sebesar arus beban.
- c. Pemisah (PMS).  
Pemisah atau *insulating (disconnecting) switch*. Pemisah (PMS) hanya boleh dioperasikan tanpa arus.  
Posisi pisau-pisau PMS harus dapat dilihat secara nyata kedudukannya, baik dalam kondisi tertutup atau terbuka, untuk keperluan keselamatan kerja.

Dalam prakteknya, sebuah PMT dikombinasikan dengan tiga PMS seperti terlihat pada Gambar II.35, yaitu dua buah PMS masing-masing di depan dan di belakang PMT, dan sebuah PMS yang digunakan untuk mentanahkan bagian instalasi yang akan dibebaskan dari tegangan yang dapat disentuh manusia untuk pelaksanaan pekerjaan perbaikan atau pemeliharaan.  
Gambar II.36 menunjukkan alat-alat pentanahan.

Konstruksi saklar, khususnya pemutus tenaga tegangan tinggi memiliki teknik pemutusan busur listrik dan teknik pembersihan kontak-kontaknya sendiri.



Gambar II.35  
Satu PMT dan tiga PMS



Gambar II.36  
Konstruksi alat pentanahan

### 3. Perkembangan konstruksi pemutus tenaga

Perkembangan konstruksi pemutus tenaga adalah sebagai berikut:

#### a. Pemutus tenaga dari udara

Bentuknya runcing, busur listrik akan timbul (meloncat) pada bagian yang runcing terlebih dahulu pada saat kontak-kontak saklar terpisah. Karena berat jenis busur listrik lebih kecil daripada berat jenis udara, busur listrik akan mengapung ke atas sehingga busur listrik memanjang dan akhirnya putus. Gambar II.37 menunjukkan pemutus tenaga udara.

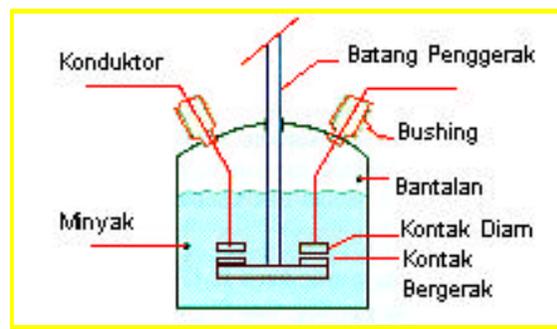


Gambar II.37  
Pemutus tenaga dari udara

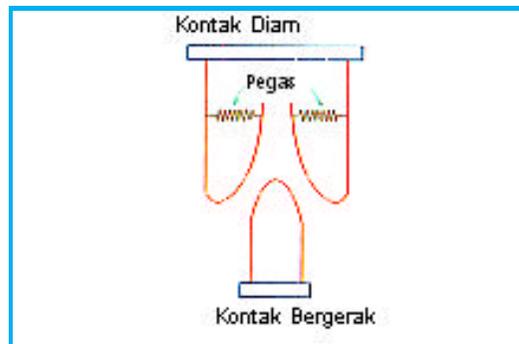
### b. Pemutus tenaga minyak banyak

Pemutus tenaga (PMT) minyak banyak atau *bulk oil circuit breaker*. Pada PMT jenis ini, kontak-kontak saklar direndam dalam minyak. Minyak berfungsi sebagai media pemutus busur listrik.

Minyak diletakkan dalam tangki sehingga konstruksi pemutus tenaga minyak banyak menjadi besar. Gambar II.38 menunjukkan konstruksi ruang pemadaman PMT minyak banyak sederhana.



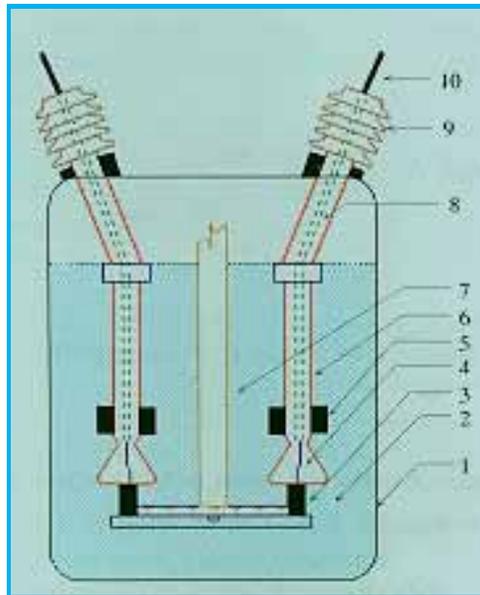
Gambar II.38  
Konstruksi ruang pemadaman PMT  
minyak banyak sederhana



Gambar II.39  
Konstruksi kontak-kontak PMT minyak banyak  
secara sederhana



Gambar II.40  
PMT 150 kV minyak banyak di CB Sunyaragi



Gambar II.41

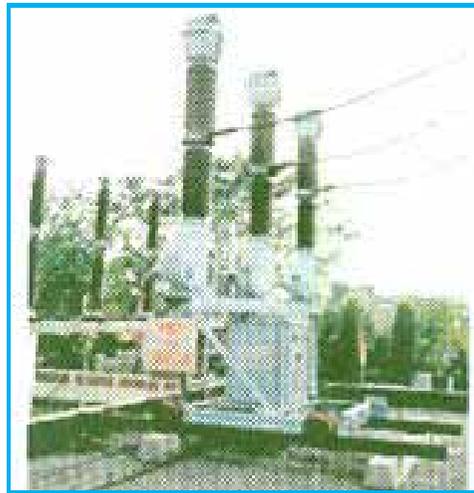
Konstruksi ruang pemadaman PMT minyak banyak

Keterangan:

- 1 : Tanki (tank)
- 2 : Minyak dielektrik (*dielectric oil*)
- 3 : Kontak bergerak (*moving contac*)
- 4 : Gas yang terbentuk oleh dekomposisi minyak dielektrik Hidrogen 70% (*gases which made by dielectric oils decomposifion*)
- 5 : Alat pengatur busur listrik (*arc control device*)
- 6 : Kontak tetap (*fixed contact*)
- 7 : Batang penggerak dari fiber glass (*tension rod which made ol fibet glass*)
- 8 : Konduktor dari tembaga (*conductor which mode of copper*)
- 9 : *Bushing*
- 10: Konduktor dari tembaga berlapis perak (*conductor, which mode of copper and silver*)

### c. Pemutus tenaga minyak sedikit

Pemutus tenaga (PMT) minyak sedikit atau *low oil content circuit breaker*. Media pemutus busur api yang digunakan adalah minyak seperti pada PMT minyak banyak, hanya saja pada PMT minyak sedikit ini ada bagian PMT yang menghasilkan minyak bertekanan untuk disemprotkan pada busur listrik, baik pada waktu PMT dibuka maupun pada waktu PMT ditutup. Gambar II.42 menunjukkan PMT minyak sedikit 70 kV.



Gambar II.42  
PMT minyak sedikit 70 kV

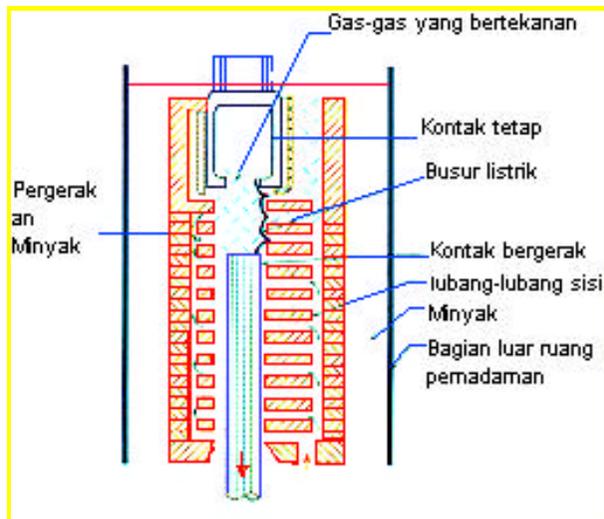
Karena menggunakan minyak bertekanan, dimensi PMT minyak sedikit lebih kecil dibandingkan dengan dimensi PMT minyak banyak. Pada PMT minyak sedikit, kualitas minyak PMT perlu diawasi secara teliti, terutama setelah PMT bekerja akibat gangguan.

Pada saat memutus busur listrik akibat arus gangguan, minyak yang menyembrot busur listrik besar karena gangguan akan mengalami karbonisasi yang besar pula.

Karbon tidak bersifat isolasi, sehingga harus dilakukan penggantian minyak PMT apabila minyaknya sudah kelihatan hitam akibat karbon.

Selain mengandalkan penyemprotan minyak untuk memutus busur listrik yang terjadi, teknik memanjangkan busur listrik juga digunakan pada cara ini, yaitu dengan meruncingkan bentuk kontak jantan dan kontak betinanya.

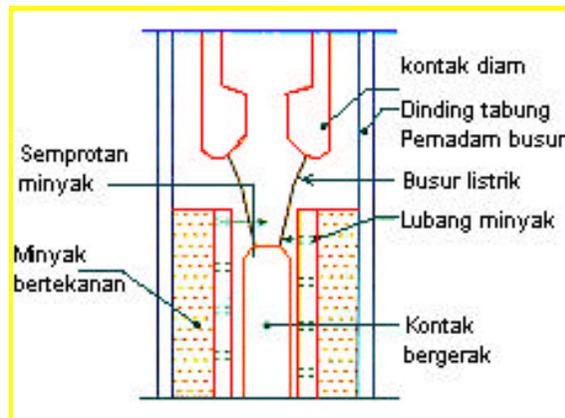
Gambar II.43 menunjukkan konstruksi ruang pemadaman pada PMT minyak sedikit secara umum.



Gambar II.43

Konstruksi ruang pemadaman pada PMT minyak sedikit secara umum

Gambar II.44 menunjukkan konstruksi ruang pemadaman PMT minyak sedikit secara sederhana.



Gambar II.44

Konstruksi ruang pemadaman PMT minyak sedikit secara sederhana

#### d. Pemutus tenaga gas SF<sub>6</sub>

Pemutus tenaga (PMT) gas SF<sub>6</sub> prinsip kerjanya serupa dengan prinsip kerja PMT minyak sedikit, bedanya terletak pada media pemutus busur yang digunakan, yaitu gas SF<sub>6</sub>.

Gas SF<sub>6</sub> memiliki sifat isolasi yang baik selain sifatnya sebagai pendingin yang baik. Pada PMT gas SF<sub>6</sub> timbul masalah perapat antara bagian PMT yang bergerak dengan yang diam karena gas dapat menembus (bocor) di antara 2 bagian yang bergeseran tersebut sehingga diperlukan perapat (*sealing*) yang baik agar dapat meminimumkan kebocoran gas SF<sub>6</sub>.

Pada PMT gas SF<sub>6</sub>, dilengkapi pengukur tekanan gas sehingga kelihatan jika tekanan gas SF<sub>6</sub> sudah berkurang dan perlu dilakukan pengisian gas SF<sub>6</sub> kembali.

Dibandingkan dengan PMT minyak sedikit, PMT gas SF<sub>6</sub> mempunyai dimensi yang kira-kira sama tetapi pemeliharannya lebih mudah.

#### e. Pemutus tenaga vakum

Pemutus tenaga (PMT) vakum merupakan PMT menggunakan teknologi mutakhir.

Dalam PMT vakum tidak ada media pemutus busur listrik dan teknik pemutus busur listrik dalam PMT vakum tergantung teknik memperpanjang busur listrik.

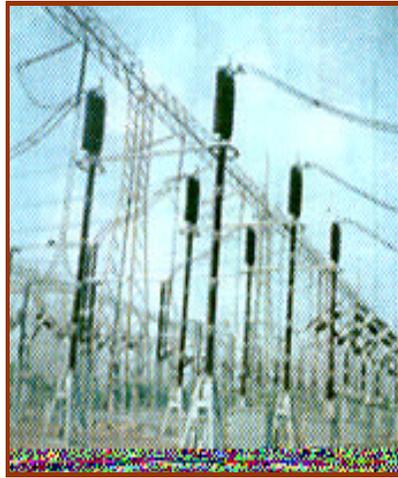
Pelaksanaan memperpanjang busur listrik dilakukan dengan membuat berbagai bentuk kontak dan setiap pabrik mempunyai bentuk kontaknya masing-masing.

Berbeda dengan PMT gas SF<sub>6</sub>, apabila terjadi kebocoran pada PMT vakum, maka tidak dapat dilakukan "pengisian" kembali karena proses membuat vakum tidak dapat dilakukan di lapangan dan tidak dikehendaki terjadinya kebocoran yang dapat mengurangi nilai kevakuman.

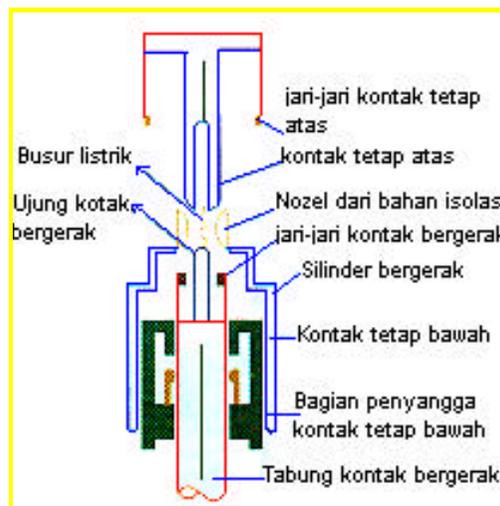
Konstruksi PMT vakum menghindari adanya celah udara sehingga pergeseran bagian yang bergerak dengan bagian yang tetap (statis) dapat menimbulkan celah udara dapat dihindari dan sebagai penggantinya digunakan logam fleksibel berbentuk gelombang yang dapat diperpanjang dan diperpendek.

Fleksibilitas logam merupakan salah satu kendala bagi perkembangan PMT *vacum* karena jarak antara kontak-kontak PMT *vacum* menjadi terbatas sehingga tegangan operasinya juga menjadi terbatas.

Gambar II.45 menunjukkan PMT SF<sub>6</sub> 500 kV buatan BBC di PLN sektor TET 500 kV Gandul



Gambar II.45  
PMT SF6 500 kV buatan BBC di PLN sektor  
TET 500 kV Gandul



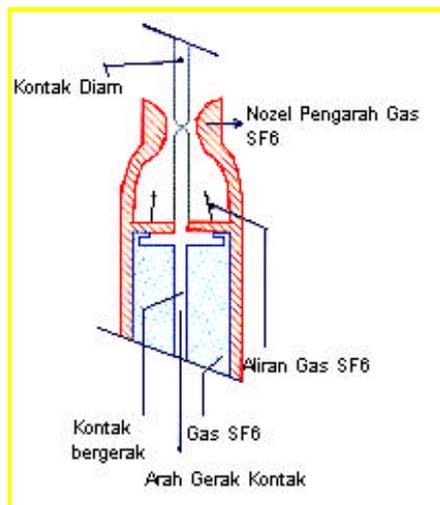
Gambar II.46  
Konstruksi ruang pemadaman PMT S



Gambar II, 47  
Potongan PMT untuk rel berisolasi gas SF6 72,5-245 kV

- Keterangan:
- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| 1 : Isolator penopang         | 8 : Penyerap udara lembab  |
| 2 : Kontak tetap              | 9 : Saklar yang digunakan untuk mengatur kerapatan Gas SF <sub>6</sub> |
| 3 : Kontak bergerak           | 10 : Pegas pembuka   |
| 4 : Pipa penghembus           | 11 : Batang pengendali   |
| 5 : Torak penekan SF          | 12 : Mekanik penggerak   |
| 6 : Kontak busur listrik      | 13 : Isolator pengendali   |
| 7 : Kontak dengan ujung tajam | 14 : Rongga pemutus  |

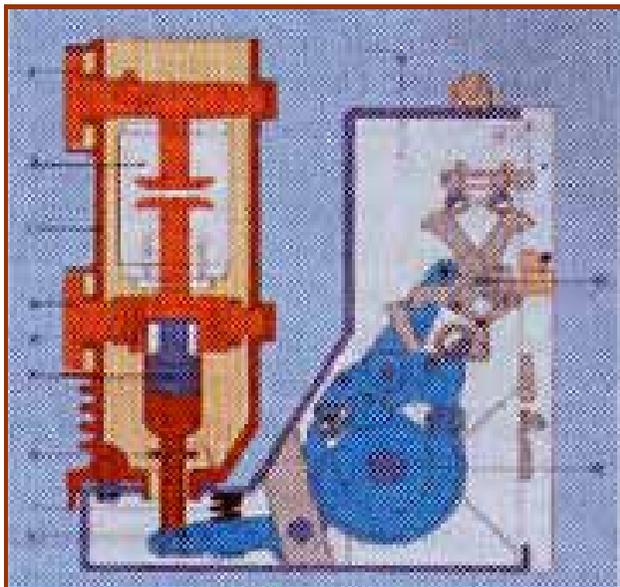
Gambar II.48 menunjukkan konstruksi ruang pemadaman PMT SF<sub>6</sub> secara sederhana.



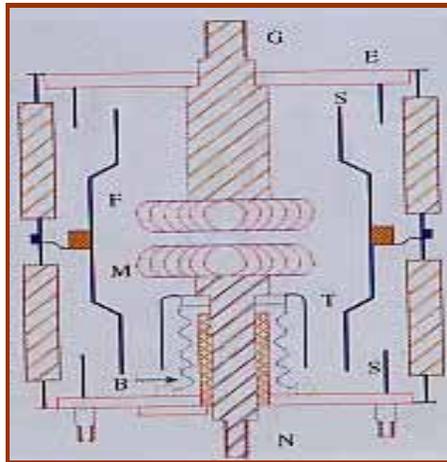
Gambar II.48  
Konstruksi ruang pemadaman PMT SF<sub>6</sub> secara sederhana



Gambar II.49  
PMT vakum buatan ABB tipe VD4



Gambar II.50  
Konstruksi dan mekanisme PMT vakum buatan ABB tipe VD4



Gambar II.51  
Konstruksi ruang pemadaman PMT vakum secara umum

Keterangan:

*B* : *Bellows* konstruksi "harmonika" (logam bergelombang);

*E* : *Ceramic or glass bottle* (keramik atau botol kaca)

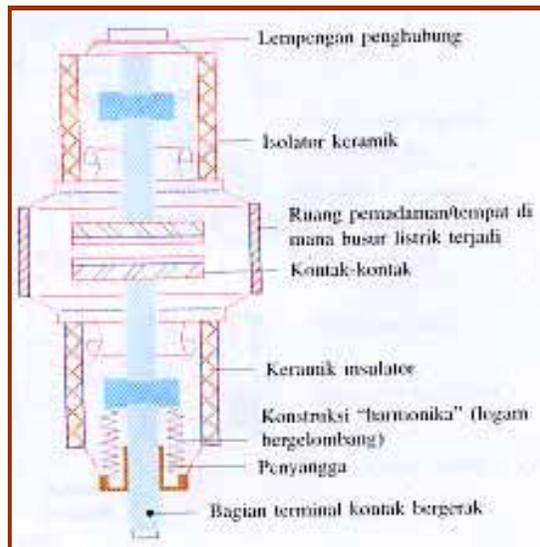
*F* : *Arcing contacts* (kontak-kontak busur listrik)

*G* : *Fixed electrode* (elektroda tetap),

*N* : *Moving electrode* (elektroda bergerak)

*S* : *Metal shield* (pelindung dari logam)

*T* : *Bellows shield* (pelindung logam bergelombang)



Gambar II.52  
Konstruksi Ruang pemadaman PMT *Vacum*

Pada celah di antara kedua kontak timbul arus berbentuk *loop* (lingkaran). Kemudian dibangkitkan suatu medan magnetik radial (busur listrik berputar tegak lurus arah kontak).

Bersamaan dengan arus yang mengalir melalui busur listrik, timbul suatu gaya Lorentz yang menarik busur listrik ke luar kontak. Gaya tersebut membuat busur listrik berputar pada ring kontak dan tertarik keluar sampai akhirnya putus.

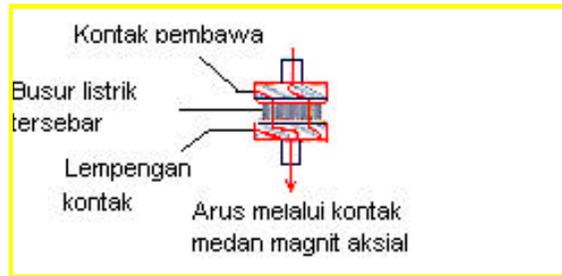
Gambar II.53 menunjukkan kontak PMT vakum medan magnet radial dan Gambar II.54 Kontak PMT vakum dengan medan magnet aksial.

Untuk mengatasi arus hubung singkat terbesar yang sering terjadi, digunakan metode lain. Pada celah di antara kedua kontak, timbul arus bentuk *coil* (kumparan) dan akan membangkitkan medan magnetik aksial (busur listrik tersebar) yang menjaga busur listrik tetap tersebar dalam arus yang sangat besar. Busur listrik didistribusikan merata pada semua permukaan kontak sehingga tidak ada tekanan lokal.

Tekniknya adalah kebalikan dari yang menggunakan medan magnetik radial. Busur listrik yang berbentuk *coil* tersebar merata dan memanjang pada saat pembukaan kontak dan ditarik ke arah pusat kontak sampai padam.



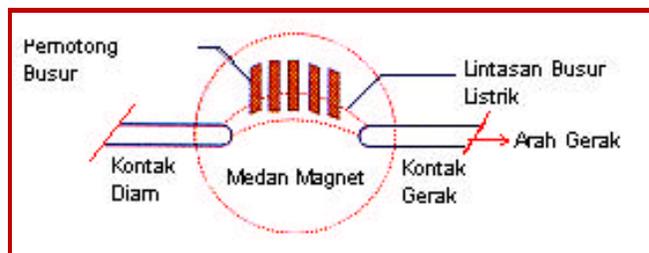
Gambar II.53  
Kontak PMT vakum dengan medan magnet radial



Gambar II.54  
Kontak PMT vakum dengan medan magnet aksial

#### f. Pemutus Tenaga Medan Magnet

Pemutus tenaga (PMT) medan magnet atau *magnetic circuit breaker* memiliki prinsip kerja seperti PMT udara, hanya di sini terdapat magnet yang berfungsi menghasilkan medan magnet yang akan menarik busur listrik yang timbul pada saat pembukaan PMT sehingga bus, listrik menjadi lebih panjang dan akhirnya putus. Gambar II.55 PMT medan magnet.



Gambar II.55  
PMT medan magnet

#### g. Pemutus Tenaga Udara Tekan

Pemutus tenaga (PMT) udara tekan dalam bahasa Inggris disebut *air blast circuit breaker*. PMT jenis ini memiliki prinsip serupa dengan prinsip kerja PMT gas SF<sub>6</sub> hanya saja pada PMT udara tekan yang menjadi media pemutus busur listrik adalah udara tekan.

Karena kemampuan isolasi udara lebih rendah daripada kemampuan isolasi gas SF<sub>6</sub>, maka pada PMT udara tekan dibutuhkan tekanan

udara yang lebih besar dibandingkan dengan tekanan gas SF<sub>6</sub> pada PMT gas SF<sub>6</sub>. Untuk mendapatkan tekanan udara yang dikehendaki pada PMT udara tekan, memakai kompresor. Hal ini tidak menguntungkan disebabkan karena harga PMT-nya menjadi lebih mahal.

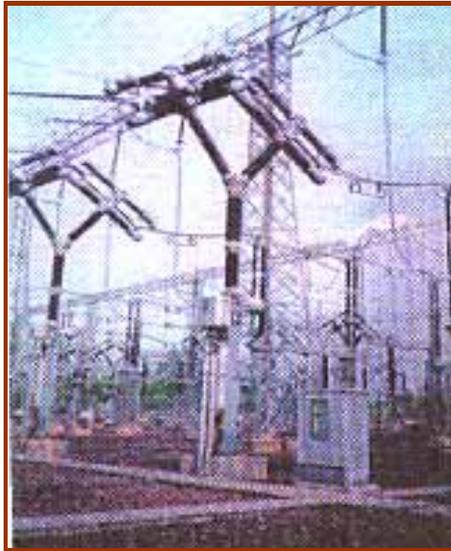
PMT 500 kV buatan BBC yang dilengkapi resistor ditunjukkan pada Gambar II.56, sedangkan yang PMT 500 kV buatan BBC tanpa resistor ditunjukkan pada Gambar II.57.

Keduanya menggunakan kapasitor. Resistor dan kapasitor berfungsi meredam busur listrik. Konstruksi ruang pemadaman PMT vakum buatan Siemens ditunjukkan pada Gambar II.58 dan PMT udara hembus dengan ruang pemadaman gas secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar II.59

Kontak-kontak utama PMT dengan resistor dan kapasitor ditunjukkan pada Gambar II.60. PMT jenis ini memiliki pemutus ganda K<sub>1</sub> dan K<sub>2</sub>. Pada waktu pembukaan PMT: resistor R<sub>1</sub> dan R<sub>2</sub> masuk bersamaan terlebih dahulu, 6 mili detik kemudian kontak K<sub>1</sub> dan disusul kontak K<sub>2</sub> membuka. Kontak K<sub>1</sub> membuka 2 mili detik lebih dahulu daripada kontak K<sub>2</sub>. Pada saat ini kapasitor C<sub>1</sub> dan kapasitor C<sub>2</sub> menampung tenaga listrik yang dihasilkan busur listrik, sehingga busur listrik bisa dipadamkan, kapasitor K<sub>1</sub> dan K<sub>2</sub> juga berfungsi sebagai pembagi tegangan agar tegangan antara kontak K<sub>1</sub> dan kontak K<sub>2</sub> sama.

Kontak K<sub>1</sub> membuka kira-kira 15-17 mili detik lebih dahulu daripada kontak K<sub>2</sub>. resistor R<sub>1</sub> dibuka 17 mili detik setelah kontak K<sub>1</sub> membuka atau 15 mili detik setelah kontak K<sub>2</sub> membuka. Dua mili detik kemudian resistor R<sub>2</sub> dibuka. Resistor R<sub>1</sub> dan R<sub>2</sub> berfungsi memperkecil busur listrik yang terjadi dan besarnya (nilai tahanannya) tergantung kepada impedansi saluran transmisi yang dibuka oleh PMT bersangkutan.

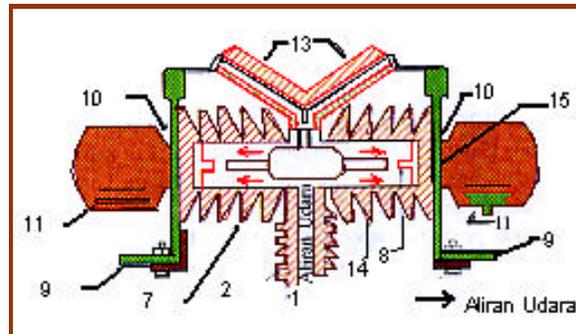
Pada proses penutupan PMT, kedua resistor R<sub>1</sub> dan R<sub>2</sub> masuk bersamaan kemudian 15 mili detik kontak K<sub>1</sub> masuk disusul kontak K<sub>2</sub>, 2 mili detik kemudian. 17 mili detik setelah kontak K<sub>1</sub> masuk atau 15 mili detik setelah kontak K<sub>2</sub> masuk, resistor R<sub>1</sub> dibuka dan 2 mili detik kemudian resistor R<sub>2</sub> dibuka.



Gambar II.56  
PMT 500 kV buatan BBC yang dilengkapi resistor



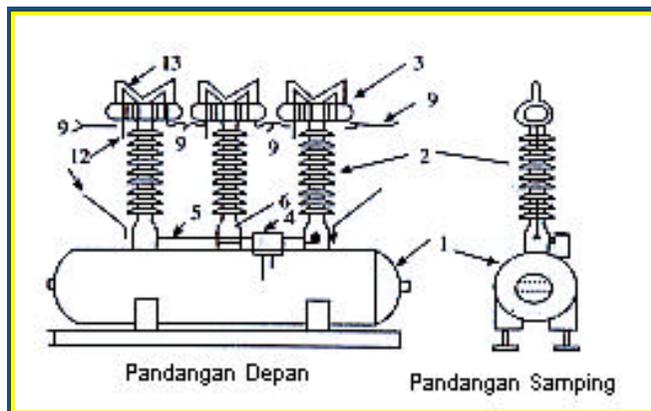
Gambar II.57  
PMT 500 kV buatan BBC tanpa dilengkapi resistor



Gambar II.58  
Konstruksi ruang pemadaman PMT Vakum  
buatan Siemens

Keterangan

- |  |   |
|--|---|
| 1. Tangki persediaan udara dari plat baja                | 8. Kontak bergerak dari tembaga                           |
| 2. Isolator berongga dari isolator steatit atau porselen | 9. Terminal dari tembaga atau perak                       |
| 3. Ruang pemadaman busur listrik                         | 10. Pegas penekan dari campuran baja                      |
| 4. Mekanisme penggerak                                   | 11. Pelepas udara keluar                                  |
| 5. Batang penggerak dari baja                            | 12. Tanduk busur listrik dari tembaga                     |
| 6. Katup pneumatik                                       | 13. Unit tahanan  |
| 7. Kontak tetap dari tembaga                             | 14. Penutup ruang pemutusan berupa isolator atau porselen |
|  | 15. Saluran   |

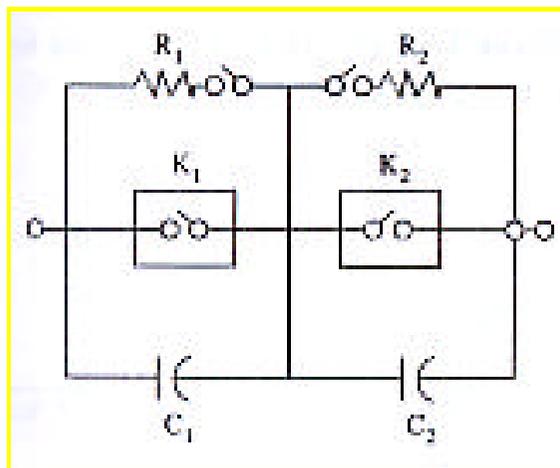


Gambar II.59  
PMT udara hembus dengan ruang pemadaman  
gas secara keseluruhan

## h. Proses Terjadinya Busur Listrik

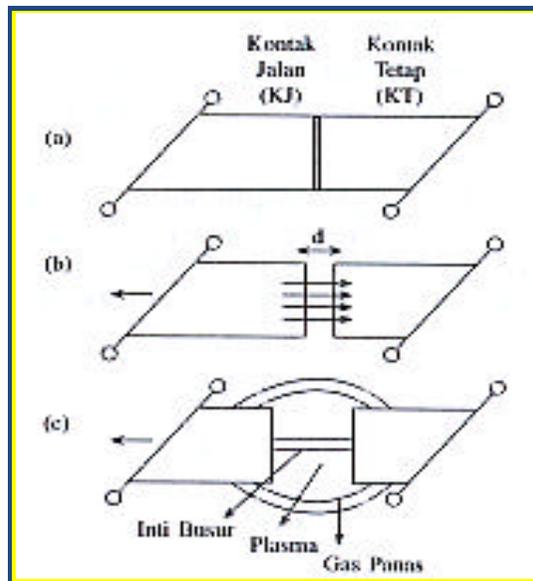
Gambar II.60 menunjukkan kondisi kontak dari sebuah saklar dalam keadaan tertutup (a), mulai membuka (b) dan sudah terbuka lebar (c). Pada saklar terdapat kontak jalan (KJ) dan kontak tetap, (KT). Pada keadaan (a), kontak kontak tertutup, tidak ada beda potensial antara KJ dan KT.

Kemudian kontak KJ digerakkan ke kiri sehingga ada celah antara KJ dan KT, terjadi beda potensial antara KJ dan KT. Beda potensial yang semula sama dengan nol sewaktu KJ dan KT tertutup, naik menuju nilai tegangan operasi dari saklar, melalui periode transien. Jika jarak antara KJ dan KT semakin besar, maka kuat medan listrik antara KJ dan KT semakin turun, karena kuat medan listrik.



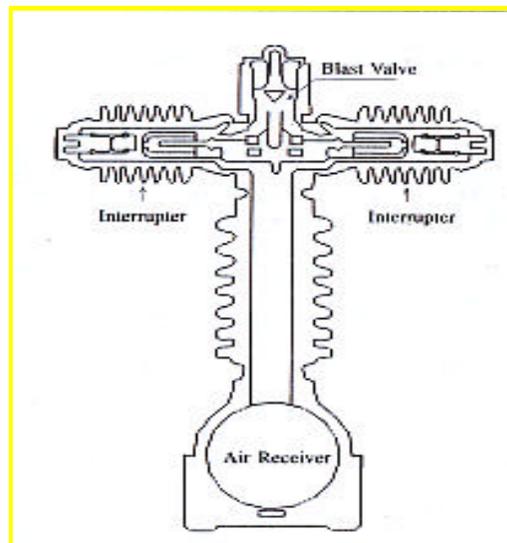
Gambar II. 60

Hubungan resistor dan kapasitor dengan kontak-kontak utama  
PMT udara tekan 500 kV buatan BBC



Gambar II.61

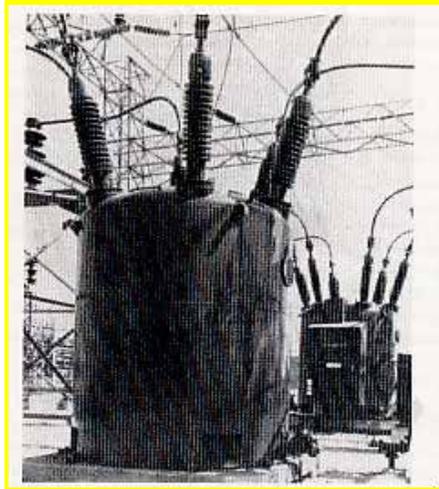
(a) kondisi kontak dari sebuah saklar dalam keadaan tertutup, (b) mulai membuka dan (c) sudah terbuka lebar



Gambar II.62

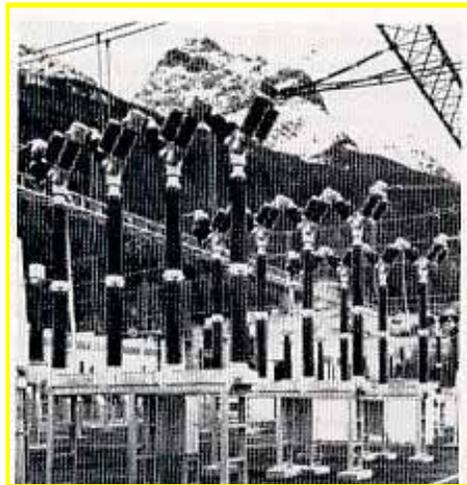
Penampung udara, ruang pemutus, dan katup penghembus dari air *blast circuit breaker*

Gambar II.63 menunjukkan contoh *circuit breaker* tiga phase 1200 A 115 kV, Bill 550 kV (Courtesy of General Electric) dan Gambar II.64 menunjukkan *circuit breaker* oil minimum untuk instalasi 420 kV, 50 Hz (Courtesy of ABB)



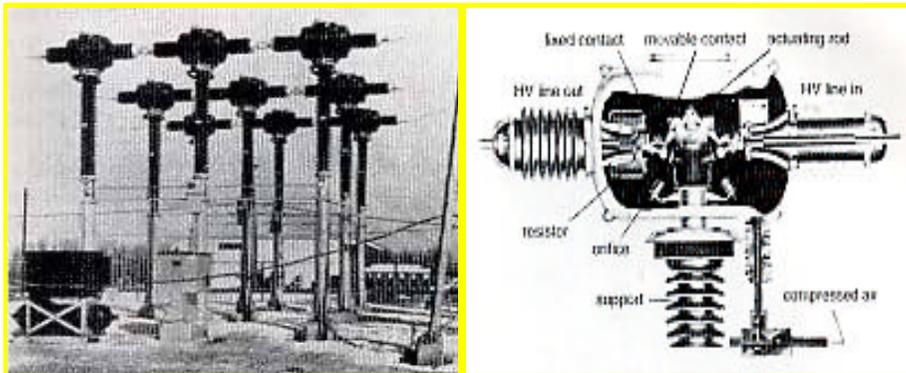
Gambar II.63

Contoh *circuit breaker* tiga phase 1200A 115 kV, Bill 550 kV  
(Courtesy of General Electric)



Gambar II.64

*Circuit breaker* oli minimum untuk instalasi 420 kV, 50 Hz  
(Courtesy of ABB)



a. *Air blast circuit breaker*  
2000A 362 kV

b. *Air blast circuit breaker, over voltage*  
*breaker open*

Gambar II.65  
*Air blast circuit breaker* 2000A 362 kV  
(Courtesy of General Electric)

Gambar II.66 menunjukkan contoh *Switchgear high density* yang memiliki kapasitas tegangan dalam satuan Mega Volt (MV)



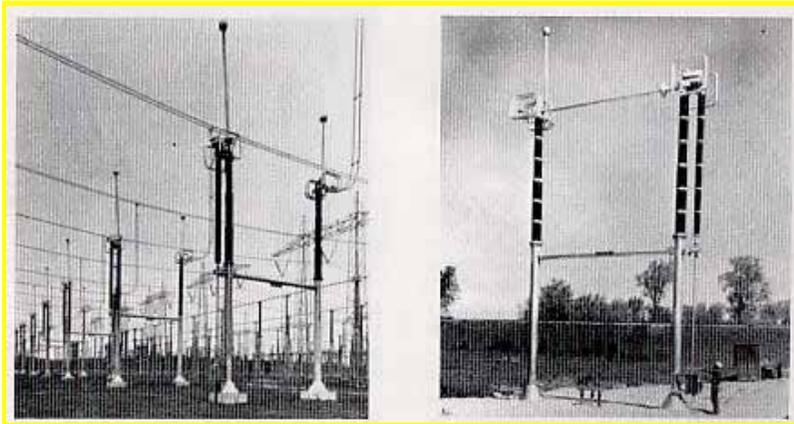
Gambar II.66  
*Switchgear High Density MV*



Gambar II. 67  
*Circuit breaker enclosed 550 kV  
15 group enclosed SF<sub>6</sub>*



Gambar II.68  
*Vacuum circuit breaker Combined Switchgear memiliki 72,5 kV  
(Courtesy of General Electric)*



Gambar II.69

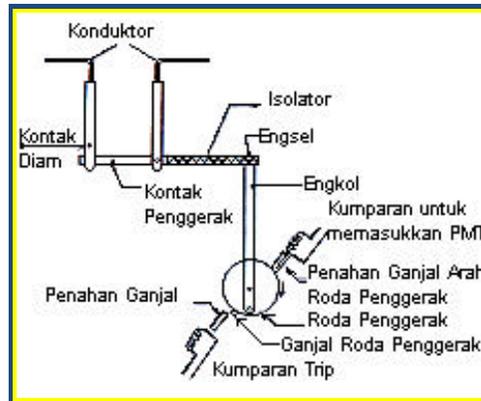
*Horn-gap disconnecting switch* 1 kutub 3 phase 725 kV 60 Hz, kiri posisi terbuka dan kanan tertutup 10 siklus 1200 kA Bill 2200 kV (Courtesy of Kearney)

### E. Mekanisme Pemutus Tenaga (*Switchgear*)

Penutupan dan pembukaan PMT memerlukan gerakan mekanis yang cepat dan tegas. Hal ini disebabkan apabila gerakan ini lambat dan ragu-ragu, maka proses pemutusan busur listrik akan mengalami kegagalan.

Untuk mendapatkan gerakan yang cepat dan tegas, diperlukan suatu mekanisme pemutus tenaga (*switchgear*) penggerak berdasarkan energi pegas atau energi udara tekan (*pneumatic*) atau energi tekanan minyak (*hydraulic*).

Gambar II.70 menunjukkan mekanisme penggerak PMT yang menggunakan pegas dalam keadaan tertutup dilihat dari sisi depan.

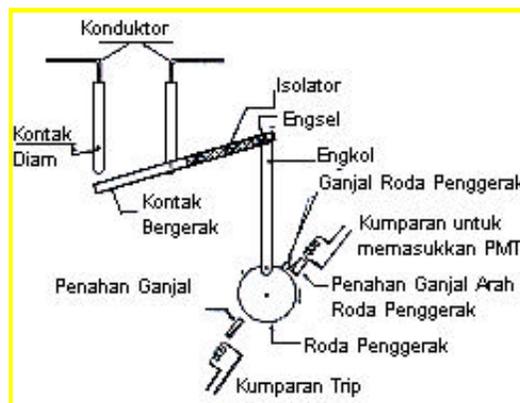


Gambar II.70

Mekanisme penggerak PMT menggunakan pegas dalam keadaan tertutup dilihat dari sisi depan

Gambar II.71 menunjukkan mekanisme penggerak PMT yang menggunakan pegas dalam keadaan terbuka dilihat dari sisi depan.

Untuk menggambarkan proses pengisian penegangan pegas melalui roda gigi yang ikatannya dengan poros hanya untuk gerakan satu arah seperti halnya roda rantai sepeda.



Gambar II.71

Mekanisme penggerak PMT yang menggunakan pegas keadaan terbuka dilihat dari sisi depan

Pada waktu mengisi penegangan pegas, roda satu arah, yaitu roda No. 2. diputar ke arah yang tidak memutar poros tetapi menambah menegangkan pegas. Setelah pegas terisi (tertarik) penuh, maka pegas siap menutup PMT. Dengan membuka ganjal pegas yang pertama, yaitu

dengan cara menarik ganjal ini dengan kumparan penutup (*closing coil*), maka pegas akan lepas sampai terhenti gerakannya oleh ganjal kedua.

Gerakan pegas dari ganjal pertama ke ganjal kedua telah memutar roda No. 1 (satu) 180 derajat yang memutar batang penggerak kontak-kontak PMT sehingga menutup, lalu PMT masuk.

Jika ganjal yang kedua ditarik oleh kumparan pembuka (*trip coil*), maka roda No. 1 (satu) berputar 180 derajat lagi dan batang penggerak kontak-kontak PMT bergerak membuka kontak-kontak PMT lalu PMT *trip*.

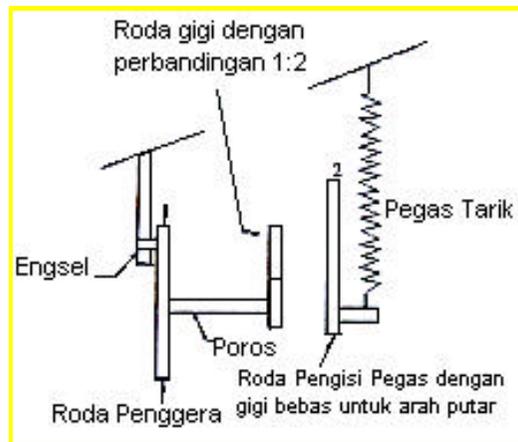
Setelah PMT *trip*, pegas menjadi tidak tegang lagi karena sudah tidak menyimpan energi dan rangkaian listrik PMT otomatis menggerakkan motor arus searah menambah menegangkan pegas dengan jalan memutar roda ke arah yang tidak memutar poros (arah penegangan pegas).

Motor pengisi pegas harus motor arus searah yang digerakkan oleh baterai aki karena dalam keadaan gangguan sering pasokan tegangan bolak-balik dalam gedung hilang sehingga motor pengisi pegas tetap dapat berfungsi dengan pasokan energi yang dipasok baterai.

Gambar II.72 menunjukkan mekanisme penggerak PMT menggunakan pegas dilihat dari samping.

*Coil trip* dan *closing coil* juga menggunakan tegangan arus searah yang dipasok oleh baterai.

Baterai harus handal untuk keberhasilan kerja PMT. Baterai perlu dipelihara dengan baik dan kondisinya perlu dipantau secara terus menerus. Kegagalan PMT bekerja dapat terjadi akibat baterai terlalu rendah kemampuannya sehingga tidak mampu men-*trip coil* PMT dan akhirnya PMT tidak bekerja jika terjadi arus gangguan dan dapat berakibat fatal dan bahkan instakasi dapat terbakar.



Gambar II.72

Mekanisme penggerak PMT menggunakan pegas dilihat dari samping

Dalam praktik, PMT di-*trip* melalui *trip coil* oleh relai (alat proteksi) atau oleh operator (manual), sedangkan pemasukan PMT melalui *closing coil* kebanyakan dilakukan secara manual oleh operator.

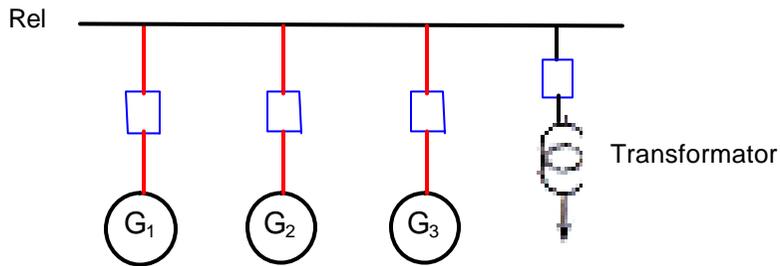
## F. Instalasi Pemakaian Sendiri

Pada pusat pembangkit listrik memerlukan tenaga listrik untuk pemakaian di dalam pusat pembangkit listrik.

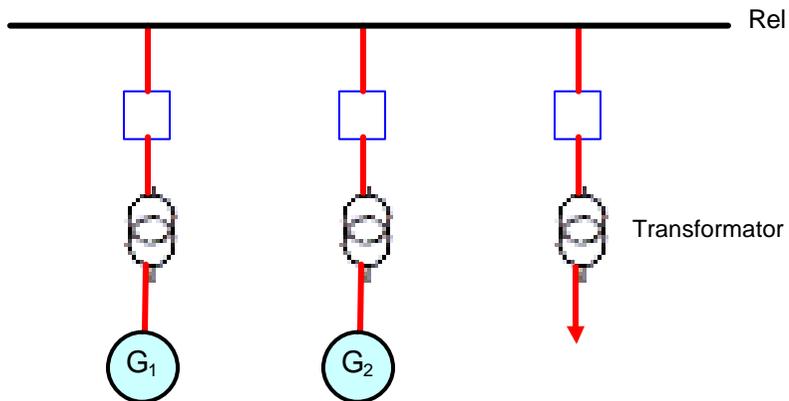
Tenaga listrik untuk pemakaian di dalam pusat pembangkit listrik digunakan untuk:

1. Lampu penerangan
2. Penyejuk udara
3. Menjalankan alat-alat bantu unit pembangkit, seperti: pompa air pendingin, pompa minyak pelumas, pompa transfer bahan bakar minyak, mesin pengangkat, dan lain-lain.
4. Pengisian baterai aki yang merupakan sumber arus searah bagi pusat pembangkit listrik.

Gambar II.73a menggambarkan instalasi pemakaian sendiri dari pusat pembangkit listrik yang kapasitas unit pembangkitnya relatif kecil, misalnya di bawah 5 MW.



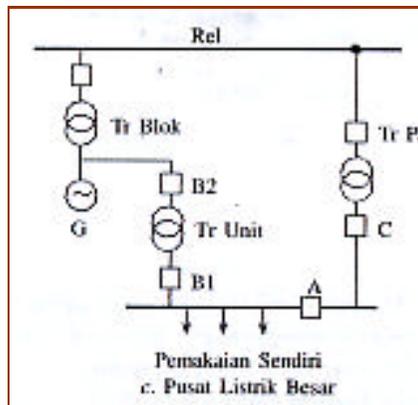
Gambar II.73a  
Instalasi pemakaian sendiri pusat pembangkit listrik  
kapasitas di bawah 5 MW



Gambar II.73b  
Instalasi pusat listrik kapasitas 5 MW sampai 15 MW

Gambar II.73b adalah pusat listrik dengan kapasitas unit pembangkit antara 5 MW sampai 15 MW.

Gambar II.73c adalah instalasi pusat listrik dengan unit pembangkit yang mempunyai kapasitas di atas 15 MW. Batas-batas ini bukan batas yang pasti, melainkan hanyalah perkiraan.



Gambar II.73c

Instalasi sendiri pada pusat listrik dengan kapasitas di atas 15 MW

Keterangan:

G = generator

PS = transformator untuk pemakaian sendiri

Tr blok = transformator blok

Pada unit pembangkit besar, setiap unit pembangkit memiliki transformator pemakaian sendiri (Tr PS) yang dipasang langsung oleh generator (G). Tetapi pada saat *start*, generator (G) belum berputar sehingga belum menghasilkan tegangan.

Sedangkan pada saat itu sudah diperlukan daya untuk menjalankan alat-alat bantu, maka daya terlebih dahulu diambil dari transformator pemakaian sendiri bersama. Setelah generator (G) berputar dan menghasilkan tegangan, PMT B ditutup. Kemudian disusul dengan pembukaan PMT A sehingga pasokan daya alat-alat bantu berpindah ke generator (G).

Pada saat PMT B ditutup dan sebelum PMT A dibuka, terjadi penutupan rangkaian ring. Perlu diperhatikan bahwa transformator-transformator yang ada dalam ring tidak menimbulkan pergeseran fasa tegangan sehingga tidak timbul gangguan.

Besarnya energi yang diperlukan untuk pemakaian sendiri berkisar antara 1-10% dari produksi energi yang dihasilkan pusat listrik. Hal ini sangat tergantung kepada jenis pusat listriknya, di mana yang paling kecil umumnya PLTA dan yang paling besar umumnya PLTU yang menggunakan bahan bakar batu bara.

Apabila terjadi gangguan besar dan semua unit pembangkit trip, maka tidak tersedia tegangan untuk menjalankan alat-alat bantu dalam rangka

*start* kembali. Dalam keadaan demikian diperlukan pengiriman tegangan dari luar pusat listrik atau dalam pusat listrik, di mana seharusnya ada unit pembangkit yang dapat *start* sendiri (*black start*) tanpa ada tegangan dari luar.

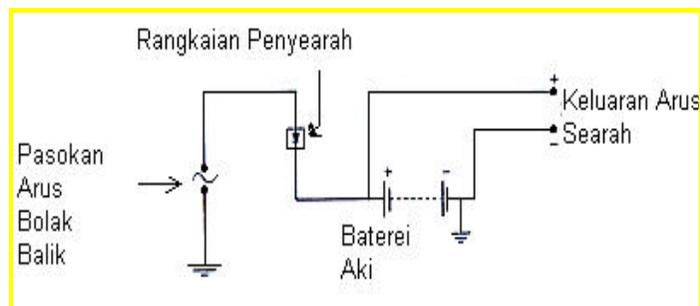
Umumnya yang bisa melakukan *black start* kebanyakan adalah unit pembangkit listrik tenaga air (PLTA) atau unit pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD).

### G. Baterai Aki

Pusat listrik selalu memerlukan sumber arus searah, terutama untuk:

- Menjalankan motor pengisi (penegang) pegas PMT.
- Mentrip PMT apabila terjadi gangguan.
- Melayani keperluan alat-alat telekomunikasi.
- Memasok keperluan instalasi penerangan darurat.

Baterai aki merupakan sumber arus searah yang digunakan dalam pusat listrik. Baterai aki harus selalu diisi melalui penyearah. Gambar II.74 menunjukkan instalasi baterai dan pengisiannya.



Gambar II.74

Instalasi baterai dan pengisiannya

Kutub negatif dari baterai sebaiknya ditanah untuk memudahkan deteksi gangguan hubung tanah pada instalasi arus searahnya.

Ada 2 macam baterai aki yang dapat digunakan di pusat listrik, yaitu baterai asam dengan kutub timah hitam dan baterai basa yang menggunakan nikel cadmium (NiCd) sebagai kutub.

Baterai asam timah hitam menggunakan plumbum oksida ( $PbO_2$ ) sebagai kutub positif dan sebagai kutub negatif adalah plumbum (Pb). Sedangkan sebagai elektrolit digunakan larutan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ).

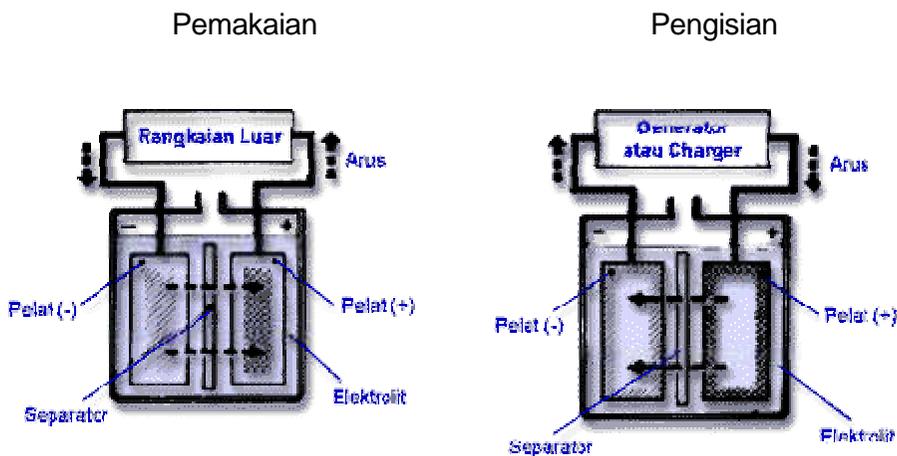
Baterai basa *nikel cadmium* menggunakan *nikel oksihidrat* (NiOH) sebagai kutub positif dan cadmium (Cd) sebagai kutub negatif. Sedangkan sebagai elektrolit digunakan larutan potas kostik (KOH).

Untuk daerah panas dengan suhu di atas  $25^{\circ}$  C, baterai asam timah hitam lebih cocok daripada baterai basa nikel cadmium.

Pemeliharaan baterai aki paling penting adalah:

- Pemantauan besarnya tegangan listrik
- Berat jenis elektrolit
- Kebersihan ruangan, dan
- Ventilasi ruangan.

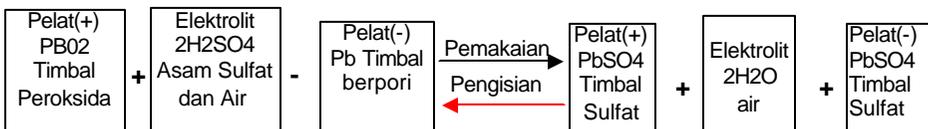
### Perubahan Kimia Selama Pengisian dan Pemakaian Aki



Gambar II.75  
Perubahan Kimia Selama Pengisian dan Pemakaian Aki

#### Kondisi Bermuatan Penuh

#### Kondisi Terpakai Habis



### 1. Perubahan kimia pada saat pelepasan muatan listrik

Aki memberikan aliran listrik jika dihubungkan dengan rangkaian luar misalnya, lampu, radio dan lain-lain. Aliran listrik ini terjadi karena reaksi kimia dari asam sulfat dengan kedua material aktif dari plat positif dan plat negatif. Pada saat pelepasan muatan listrik terus menerus, elektrolit akan bertambah encer dan reaksi kimia akan terus berlangsung sampai seluruh bahan aktif pada permukaan plat positif dan negatif berubah menjadi timbal sulfat. Jika Aki tidak dapat lagi memberi aliran listrik pada tegangan tertentu, maka aki tersebut dalam keadaan lemah arus (soak).

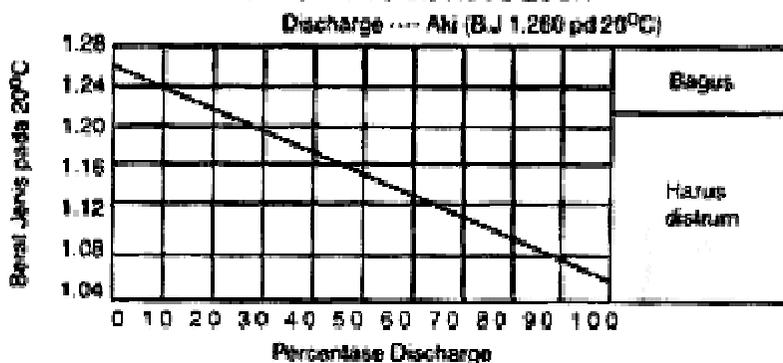
### 2. Perubahan kimia pada saat pengisian muatan listrik

Pada proses pengisian muatan listrik, kembali terjadi proses reaksi kimia yang berlawanan dengan reaksi kimia pada saat pelepasan muatan. Timbal peroksida terbentuk pada plat positif dan timbal berpori terbentuk pada plat negatif, sedangkan berat jenis elektrolit akan naik, karena air digunakan untuk membentuk asam sulfat. Aki kembali dalam kondisi bermuatan penuh.

### 3. Penurunan berat jenis accu zuur selama pelepasan muatan listrik

Berat jenis accu zuur akan turun sebanding dengan derajat pelepasan muatan, jadi jumlah energi listrik yang ada dapat ditentukan dengan mengukur berat jenis accu zuurnya, misalnya aki mempunyai berat jenis accu zuur 1.260 pada 20°C, bermuatan listrik penuh, setelah melepaskan muatan listrik berat jenisnya 1.200 pada 20°C, maka Aki masih mempunyai energi listrik sebesar 70%.

Kapasitas Aki dengan B.J Accu Zuur



Gambar II.76  
Grafik Kapasitas Aki

#### 4. Berat jenis *accu zuur* tergantung dari suhu

Berat jenis *accu zuur* berubah tergantung dari temperaturnya, jadi pembacaan berat jenis pada skala hidrometer kurang tepat sebelum dilakukan koreksi suhu. Volume *accu zuur* bertambah jika dipanaskan dan turun jika dingin, sedang beratnya tetap. Jika Volume bertambah sedang beratnya tetap maka berat jenis akan turun. Berat jenis turun sebesar 0.0007 untuk kenaikan tiap derajat celcius dalam suhu batas normal Aki. Standar berat jenis menurut perjanjian adalah untuk suhu 20°C.

### H. Transformator

Dalam pusat pembangkit listrik yang besar (di atas 100 MW) terdapat beberapa transformator.

Gambar II.75 menunjukkan macam-macam transformator yang ada di pusat pembangkit tenaga listrik.

Macam-macam transformator ini adalah:

#### 1. Transformator penaik tegangan generator

Jika rel dalam pusat listrik menggunakan tegangan di atas tegangan generator sinkron 3 fasa, maka tegangan dari generator dinaikkan terlebih dahulu melalui transformator penaik tegangan sebelum dihubungkan ke rel.

Transformator penaik tegangan generator merupakan satu kesatuan dengan generator terutama dari segi proteksi.

#### 2. Transformator unit pembangkit

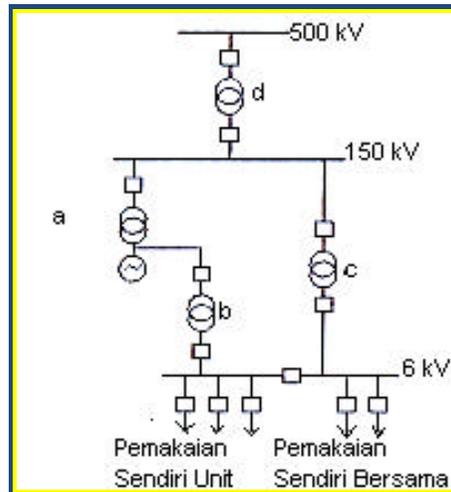
Setiap Unit Pembangkit yang besar (di atas 10 MW) umumnya mempunyai transformator unit pembangkit, yaitu transformator yang mengambil daya langsung dari generator untuk memasok alat-alat bantu unit pembangkit yang bersangkutan, seperti: motor pompa pendingin, motor pompa minyak pelumas, dan lain-lain.

#### 3. Transformator pemakaian sendiri

Transformator pemakaian sendiri mendapat pasokan daya dari rel pusat listrik kemudian memasok daya ke rel pemakaian sendiri. Rel pemakaian sendiri digunakan untuk memasok instalasi penerangan, baterai aki, mesin-mesin bengkel, mesin pengangkat, dan alat-alat bantu unit pembangkit pada periode start.

#### 4. Transformator antar rel

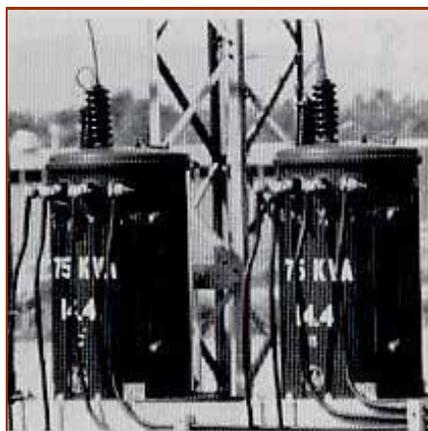
Jika di dalam pusat listrik ada beberapa rel dengan tegangan operasi yang berbeda-beda, maka ada transformator antar-rel.



Gambar II.77

Macam-Macam Transformator pada Unit Pembangkit Listrik

Adanya rel-rel dengan tegangan yang berbeda dapat disebabkan karena perkembangan sistem tenaga listrik dan juga dapat terjadi karena diperlukan rel tegangan menengah (antara 6 kV sampai 40 kV) untuk keperluan distribusi di daerah sekitar pusat listrik selain rel tegangan tinggi (di atas 60 kV) untuk saluran transmisi jarak jauh.



Gambar II.78

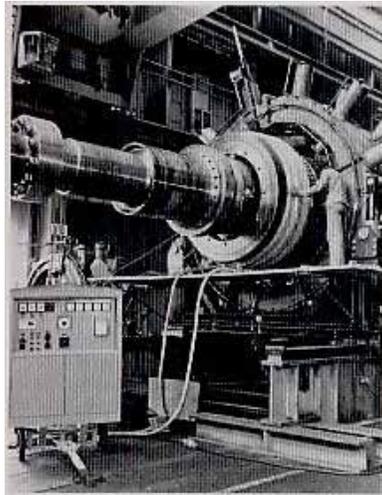
Transformator 2 Fasa Tipe OA



Gambar II.79  
Transformator 3 Phasa 1.000 MVA

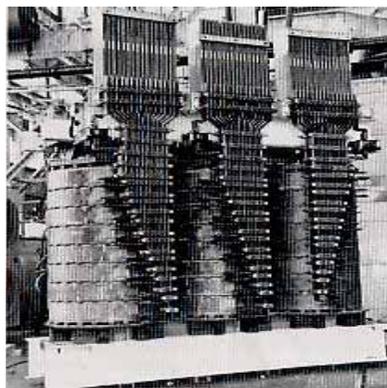


Gambar II.80  
Transformator 3 Phasa transformator 4500MVA yang  
Digunakan untuk Station Pembangkit Nuklir



Gambar II.81

Transformator Spesial pada Pembangkit Tenaga Panas Produksi ABB



Gambar II.82

Transformator 3 fasa dengan daya 36 MVA 13,38 kV

Transformator dengan tegangan di atas 60 kV, titik netralnya umumnya ditanahkan secara langsung dengan maksud untuk menghemat biaya isolasi. Untuk transformator dengan tegangan di bawah 60 kV, titik netralnya kebanyakan ditanahkan melalui impedansi berupa tahanan atau kumparan dengan tujuan menghasilkan sedikit gangguan hubung tanah yang cukup besar agar relai hubung tanah bekerja.

Transformator yang dipakai dalam pusat listrik besar umumnya mempunyai daya besar (di atas 1 MVA) dengan tegangan tinggi mulai 70 kV keatas. Transformator-transformator yang besar ini perlu diamati kualitas layaknya dan juga isolasi dari *bushingnya*.

Minyak transformator berfungsi sebagai media pendingin dan juga sebagai media isolasi. Minyak transformator terbuat dari bahan organik, ikatan atom C dengan atom H. Pada transformator minyak mengalami suhu relatif tinggi (di atas 50°C) dan juga mengalami busur listrik apabila ada *on load tap changer* (pengubah sadapan berbeban). Di samping itu dalam transformator terdapat oksigen ( $O_2$ ) dari udara, dan juga air ( $H_2O$ ) dari kelembaban udara. Hal ini semua menyebabkan ada sebagian minyak transformator yang terurai dan bentuk  $H_2O$ , asam karbonat dan karbon (C).

Pembentukan zat-zat ini menyebabkan turunnya kualitas isolasinya bahkan pembentukan asam karbonat ini bisa menimbulkan korosi terhadap bagian-bagian yang terbuat logam seperti inti transformator dan tangki.

Bagian bushing transformator yang berdekatan dengan bagian atas tangki transformator, yang terdiri dari porselin dan lapisan kertas yang diseling dengan logam. Bagian-bagian ini perlu dipantau, nilai isolasinya, sebab apabila nilai isolasinya terlalu rendah bisa terjadi hubung singkat fasa ke tangki yang bisa menyebabkan transformator meledak. Nilai isolasi minyak dan juga nilai isolasi bagian dari bushing dengan tangki tersebut di atas sekarang bias dipantau secara *on line*.

Kondisi transformator juga bisa dianalisis atas dasar analisis getaran akustik yang dipancarkan bagian bagian transformator. Cara ini bisa dilakukan secara, *on line*. Secara, *off line* kondisi transformator bisa dicek melalui pengukuran arus yang dihasilkannya apabila disuntikkan suatu tegangan 10 Volt yang frekuensinya diubah-ubah (beberapa kilo Hertz)

#### **a. Transformator hubungan delta-delta (*delta-delta connection*).**

Transformator 3 fasa P, Q dan R seperti ditunjukkan pada Gambar II.83 merubah tegangan masuk saluran transmisi A, B, C menjadi tegangan keluaran saluran transmisi 1, 2 dan 3. Saluran masukan dihubungkan ke sumber dan saluran keluaran dihubungkan ke beban. Transformator dihubungkan delta-delta. Terminal  $H_1$  untuk setiap transformator dihubungkan ke terminal  $H_2$  untuk transformator berikutnya. Demikian juga sama dengan terminal  $X_1$  dan  $X_2$  untuk transformator berikutnya dihubungkan secara bersamaan, seperti ditunjukkan pada Gambar II.83. Diagram skematik ditunjukkan pada Gambar II.84.

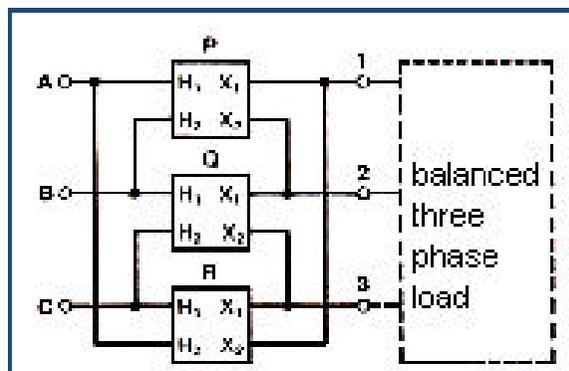
Diagram skematik digambarkan dengan cara menunjukkan tidak hanya masukan sambungannya, tetapi juga hubungan fasa antara tegangan primer dan sekunder. Setiap lilitan sekunder digambarkan secara paralel dan hubungan lilitan primer dengan cara dikopel. Selanjutnya sumber G

menghasilkan tegangan  $E_{AB}$ ,  $E_{BC}$ ,  $E_{CA}$ , seperti yang ditunjukkan pada diagram fasa. Lilitan primer dihadapkan pada arah yang sama, fasa dengan fasa, sebagai contoh, transformator primer antara saluran A dan B dihadapkan secara horisontal, dalam arah yang sama seperti fasa  $E_{AB}$ .

Karena tegangan primer dan sekunder yaitu  $E_{H_1H_2}$  dan  $E_{X_1X_2}$  yang diberikan harus dalam satu fasa, maka berikutnya  $E_{12}$  (tegangan sekunder untuk transformator P) harus dalam fasa yang sama dengan  $E_{AB}$  (tegangan primer untuk transformator yang sama). Demikian juga sama dengan  $E_{23}$  satu fasa dengan  $E_{BC}$ , dan  $E_{31}$  dengan  $E_{CA}$ .

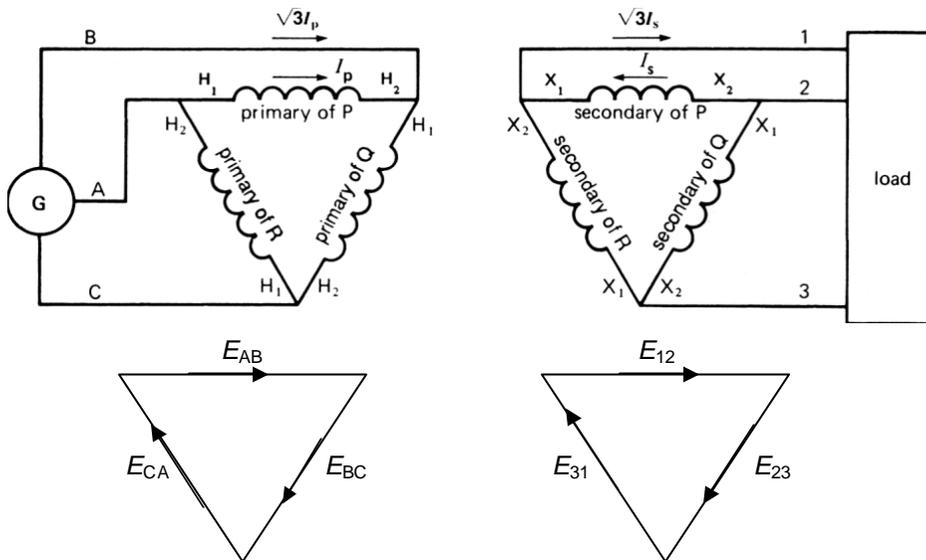
Dalam hubungan delta-delta, tegangan antara masing-masing saluran transmisi masukan dan keluaran adalah dalam satu fasa. Jika bebanimbang dihubungkan ke saluran 1-2-3, maka hasil arus keluaran adalah sama besarnya. Hal ini menghasilkan arus *line*imbang dalam saluran masukan A-B-C. Seperti dalam beberapa hubungan delta, bahwa arus *line* adalah  $\sqrt{3}$  kali lebih besar dari masing-masing arus  $I_p$  dan  $I_s$  yang mengalir dalam lilitan primer dan sekunder, ditunjukkan pada Gambar II.84. *Power rating* untuk transformator bank adalah 3 kali *rating* transformator tunggal.

Meskipun transformator bank merupakan sebuah susunan 3 fasa, setiap transformator dipertimbangkan sendiri-sendiri. Seperti pada rangkaian fasa tunggal, maka arus  $I_p$  mengalir dari  $H_1$  ke  $H_2$  dalam lilitan primer yang dihubungkan dengan arus  $I_s$  yang mengalir dari  $X_1$  ke  $X_2$  dalam lilitan sekunder.



Gambar II.83

Transformator 3 fasa hubungan *delta-delta* yang disusun dari 3 buah transformator satu fasa. A, B, dan C dihubungkan pada pembangkit listrik



Gambar II.84

Diagram Hubungan *Delta-Delta* Transformator 3 Fasa  
Dihubungkan Pembangkit listrik dan Beban (Load)

Contoh:

Transformator 3 phase dihubungkan *delta-delta step down*. Tegangan *line* 138 kV dan skunder 4,16 kV. Daya pembangkit 21 MW dengan  $\cos f$  0,86 *lagging*.

Hitung:

- Hitung daya pembangkit (MVA)
- Arus *line* sisi tegangan tinggi ( $I_1$ )
- Arus pada sisi tegangan rendah ( $I_2$ )
- Arus phase pada bagian primer ( $I_p$ )
- Arus phase pada bagian sekunder ( $I_s$ )

Penyelesaian

- Daya pembangkit (MVA)

$$\begin{aligned} S &= P/\cos f \\ &= 21/0.86 \\ &= 24.4 \text{ MVA} \end{aligned}$$

- Arus pada sisi tegangan tinggi

$$\begin{aligned} I_1 &= S/(\sqrt{3} \cdot E) \\ &= (24,4 \times 10^6)/(\sqrt{3} \times 138.000) \\ &= 102 \text{ A} \end{aligned}$$

- c) Arus pada sisi tegangan rendah  
 $I_2 = S/(\sqrt{3} \cdot E)$   
 $= (24,4 \times 10^6) / (\sqrt{3} \times 4160)$   
 $= 3.386 \text{ A}$
- d) Arus phase pada bagian primer ( $I_p$ )  
 $I_p = 102/\sqrt{3}$   
 $= 58,9 \text{ A}$
- e) Arus phase pada bagian sekunder ( $I_s$ )  
 $I_s = 3.386/\sqrt{3}$   
 $= 1.995 \text{ A}$

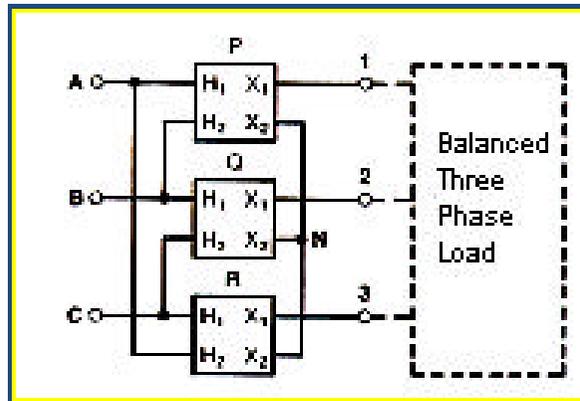
### b. Transformator hubungan delta-bintang (*delta-wye connection*)

Jika transformator dihubungkan delta-bintang, lilitan primer dihubungkan dengan cara yang sama, seperti ditunjukkan pada Gambar II.83. Untuk lilitan sekunder dihubungkan pada semua terminal  $X_2$  yang dihubungkan secara bersamaan yang dihubungkan dengan *common neutral* (N), seperti ditunjukkan pada Gambar II.85. Pada hubungan delta-bintang, tegangan yang melalui setiap lilitan primer adalah sama dengan tegangan *line* masukan. Tegangan saluran keluaran adalah sama dengan  $\sqrt{3}$  kali tegangan sekunder yang melalui setiap transformator.

Besar relatif arus pada lilitan transformator dan saluran transmisi adalah ditunjukkan pada Gambar II.86. Arus *line* pada fasa A, B dan C adalah  $\sqrt{3}$  kali arus pada lilitan sekunder. Arus *line* pada fasa 1, 2 dan 3 adalah sama dengan arus pada lilitan sekunder.

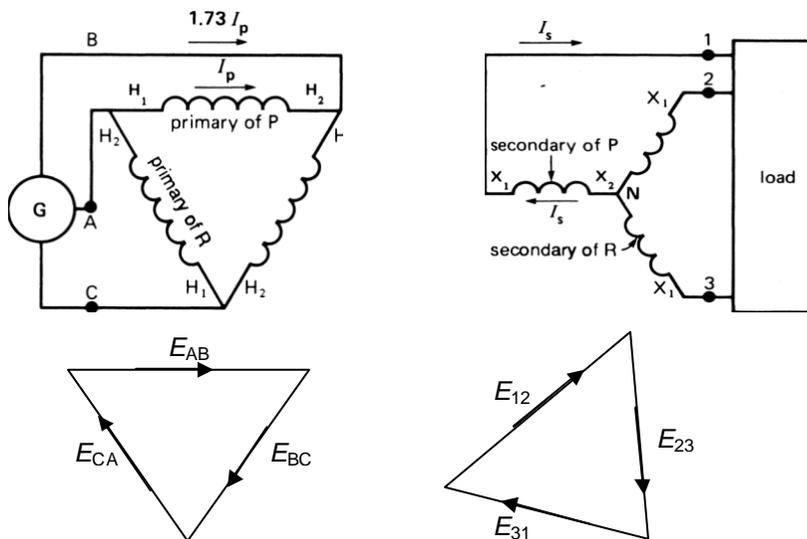
Hubungan delta-bintang menghasilkan beda fasa  $30^\circ$  antara tegangan saluran masukan dan saluran transmisi keluaran. Maka dari itu, tegangan *line* keluaran  $E_{12}$  adalah  $30^\circ$  mendahului tegangan *line* masukan  $E_{AB}$ , seperti dapat dilihat dari diagram fasor. Jika saluran keluaran memasuki kelompok beban terisolasi, beda fasanya tidak masalah. Tetapi jika saluran dihubungkan parallel dengan saluran masukan dengan sumber lain, beda fasa  $30^\circ$  mungkin akan membuat hubungan parallel parallel tidak memungkinkan, sekalipun jika saluran tegangannya sebaliknya identik.

Keuntungan penting dari hubungan bintang adalah bahwa akan menghasilkan banyak isolasi/penyekatan yang dihasilkan di dalam transformator. Lilitan HV (*high Voltage*/tegangan tinggi) telah diisolasi/dipisahkan hanya  $1/\sqrt{3}$  atau 58% dari tegangan saluran.



Gambar II.85

Transformator 3 Fasa Hubungan Delta-Bintang yang Disusun dari 3 Buah Transformator Satu Fasa



Gambar II.86

Skema Diagram Hubungan Delta-Bintang dan Diagram Phasor

Contoh:

Transformator tiga fasa *step up* dengan daya 40 MVA, 13.2 kV/80 kV hubungan *delta-wye* dihungukan pada trnasmisi (beban) tegangan 13.2 kV, jika beban 90 MVA, hitung;

- Tegangan line sekunder
- Arus dalam belitan tnasformator
- Arus line yang masuk dan yang keluar pada transmisi

Penyelesaian:

a) Tegangan line pada sekunder

$$E_s = 80/\sqrt{3} = 139 \text{ kV}$$

b) Arus dalam belitan transformator

Beban pada masing-masing phase

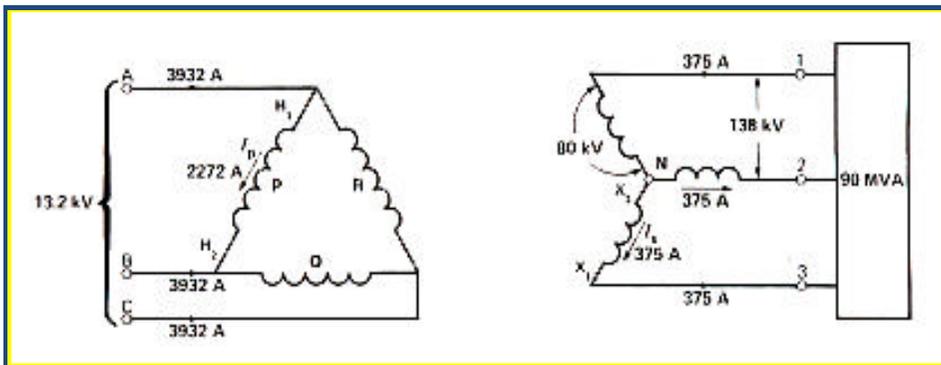
$$S = 90/3 = 30 \text{ MVA}$$

$$I_p = 30 \text{ MVA}/13,2 \text{ kV}$$

$$= 2.273 \text{ A ( arus pada belitan primer)}$$

$$I_s = 30 \text{ MVA}/80 \text{ kV}$$

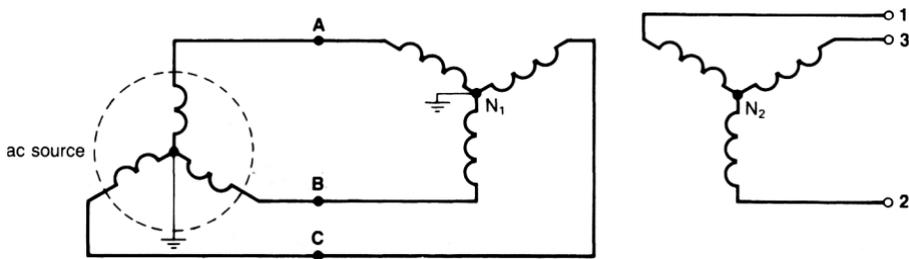
$$= 375 \text{ A ( arus pada belitan sekunder)}$$



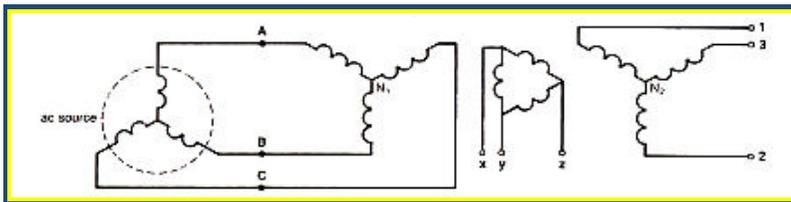
Gambar II.87  
Diagram Gambar Contoh Soal

### c. Transformator hubungan bintang-bintang (*wye-wye connection*)

Ketika transformator dihubungkan secara bintang-bintang, yang perlu diperhatikan adalah mencegah penyimpangan dari tegangan *line to neutral* (phase ke nol). Cara untuk mencegah penyimpangan adalah menghubungkan netral (nol) untuk primer ke netral (nol) sumber yang biasanya dengan cara *ground* (pentanahan), seperti ditunjukkan pada Gambar II.88. Cara lain adalah dengan menyediakan setiap transformator dengan lilitan ke tiga, yang disebut lilitan "*tertiary*". Lilitan *tertiary* untuk tiga transformator dihubungkan secara delta seperti ditunjukkan pada Gambar II.89, yang sering menyediakan cabang yang melalui tegangan di mana transformator dipasang. Tidak ada beda fasa antara tegangan *line* transmisi masukan dan keluaran untuk transformator yang dihubungkan bintang-bintang.



Gambar II.88  
Transformator 3 Phase Hubungan Bintang-Bintang



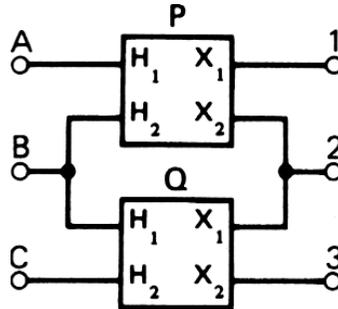
Gambar II.89  
Transformator Hubungan Bintang-Bintang dengan Belitan Tersier

#### d. Transformator hubungan open-delta

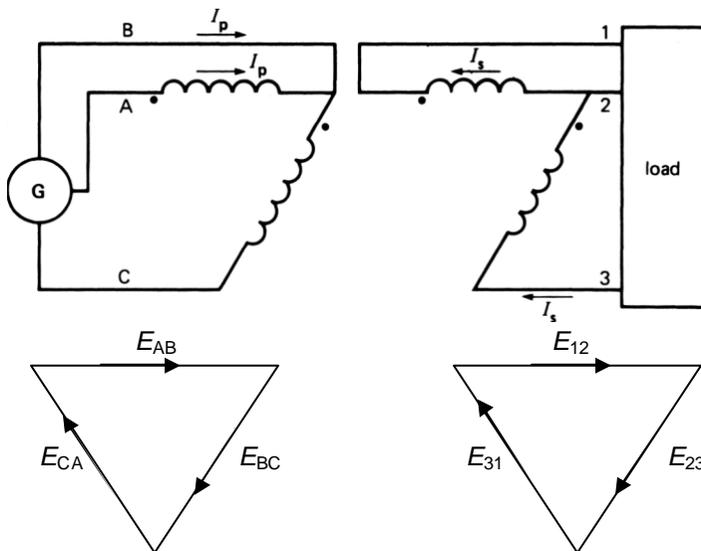
Hubungan *open-delta* ini untuk merubah tegangan sistem 3 fasa dengan menggunakan hanya 2 transformator yang dihubungkan secara *open-delta*. Rangkaian *open-delta* adalah identik dengan rangkaian delta-delta, kecuali bahwa satu transformator tidak ada (Gambar II.90). Bagaimanapun, hubungan delta jarang digunakan sebab beban kapasitif untuk transformator bank hanya 86.6% dari kapasitas transformator yang terpasang. Sebagai contoh, jika 2 transformator 50 kVA dihubungkan secara *open-delta*, kapasitas transformator bank yang terpasang adalah jelas  $2 \times 50 = 100$  kVA. Tetapi, anehnya masalah ini pernah dijumpai, bahwa transformator hanya dapat mengirimkan 86.6 kVA sebelum transformator mulai menjadi *overheat* (panas berlebih).

Hubungan *open-delta* utamanya digunakan dalam situasi darurat. Maka, jika 3 transformator dihubungkan secara delta-delta dan salah satunya rusak dan harus diperbaiki/dipindahkan, maka hal ini memungkinkan

untuk memasukkan beban secara temporer (darurat) dengan 2 transformator yang tersisa.



Gambar II.90  
Open Delta Connection



Gambar II.91  
Transformator Hubungan Open Delta

Contoh:

Transformator satu phase 2 buah 150 kVA, 7200 V/600 V dihubungkan open-delta. Hitung beban 3 phase maksimum yang terpakai

**Penyelesaian:**

Rating daya pada tiap transformator 150 kVA, sehingga daya maksimum pada beban 300 kVA.

$$I_s = 150 \text{ kVA} / 600 \text{ V} = 250 \text{ A}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot E I$$

$$= \sqrt{3} \times 600 \times 250$$

$$= 259\,800 \text{ VA}$$

$$= 260 \text{ kVA}$$

## 5. Pengujian kualitas minyak transformator

### a. Pengujian kekuatan elektrik minyak transformator

Kekuatan listrik merupakan karakteristik penting dalam material isolasi. Jika kekuatan listrik rendah minyak transformator dikatakan memiliki mutu yang jelek. Hal ini sering terjadi jika air dan pengotor ada dalam minyak transformator. Pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui kegagalan minyak transformator.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam melakukan uji kegagalan ini antara lain :

- Jarak elektroda 2.5 mm
- Bejana dan elektroda harus benar-benar kering dan bersih setiap sebelum melakukan pengujian, elektroda harus dicuci dengan minyak transformator yang akan diuji.
- Minyak yang akan diuji harus diambil dengan alat yang benar-benar bersih, minyak pertama yang keluar dibuang supaya kran-kran menjadi bersih. Minyak lama pada waktu pertama alirannya dibuang.
- Botol tempat minyak transformator ditutup dengan lilin supaya kotoran dan uap air tidak masuk.

### b. Pengujian viskositas minyak transformator

Viskositas minyak adalah suatu hal yang sangat penting karena minyak transformator yang baik akan memiliki viskositas yang rendah, sehingga dapat bersirkulasi dengan baik dan akhirnya pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung dengan baik pula.

### c. Titik nyala (*flash point*)

Temperatur ini adalah temperatur campuran antara uap dari minyak dan udara yang akan meledak (terbakar) bila didekati dengan bunga api kecil. Untuk mencegah kemungkinan timbulnya kebakaran dari peralatan dipilih minyak dengan titik nyala yang tinggi. Titik nyala dari minyak yang baru tidak boleh lebih kecil dari 135 °C, sedangkan suhu minyak bekas tidak boleh kurang dari 130 °C. Untuk mengetahui titik

nyala minyak transformator dapat ditentukan dengan menggunakan alat *Close up tester*.

#### d. Pemurnian minyak transformator

Minyak transformator dapat terkontaminasi oleh berbagai macam pengotoran seperti kelembaban, serat, resin dan sebagainya. Ketidakmurnian dapat tinggal di dalam minyak karena pemurnian yang tidak sempurna. Pengotoran dapat terjadi saat pengangkutan dan penyimpanan, ketika pemakaian, dan minyak itu sendiri pun dapat membuat pengotoran pada dirinya sendiri.

Beberapa metode pemurnian minyak transformator dijelaskan dalam bagian berikut ini:

##### 1) Mendidihkan (*boiling*)

Minyak dipanaskan hingga titik didih air dalam alat yang disebut *boiler*. Air yang ada dalam minyak akan menguap karena titik didih minyak lebih tinggi dari pada titik didih air. Metode ini merupakan metode yang paling sederhana namun memiliki kekurangan. Pertama hanya air yang dipindahkan dari minyak, sedangkan serat, arang dan pengotor lainnya tetap tinggal. Kedua minyak dapat menua dengan cepat karena suhu tinggi dan adanya udara.

Kekurangan yang kedua dapat diatasi dengan sebuah *boiler* minyak hampa udara (*vacuum oil boiler*). Alat ini dipakai dengan minyak yang dipanaskan dalam bejana udara sempit (*air tight vessel*) dimana udara dipindahkan bersama dengan air yang menguap dari minyak. Air mendidih pada suhu rendah dalam ruang hampa oleh sebab itu menguap lebih cepat ketika minyak dididihkan dalam alat ini pada suhu yang relatif rendah. Alat ini tidak menghilangkan kotoran pada kendala pertama, sehingga pengotor tetap tinggal.

##### 2) Alat sentrifugal (*Centrifuge reclaiming*)

Air serat, karbon dan lumpur yang lebih berat dari minyak dapat dipindahkan minyak setelah mengendap. Untuk masalah ini memerlukan waktu lama sehingga untuk mempercepatnya minyak dipanaskan hingga 45 - 55 °C dan diputar dengan cepat dalam alat sentrifugal. Pengotor akan tertekan ke sisi bejana oleh gaya sentrifugal, sedangkan minyak yang bersih akan tetap berada ditengah bejana. Alat ini mempunyai efisiensi yang tinggi. Alat sentrifugal hampa merupakan pengembangannya.

Bagian utama dari drum adalah drum dengan sejumlah besar piring/pelat (hingga 50) yang dipasang pada poros vertikal dan berputar bersama-sama. Karena piring mempunyai spasi sepersepuluh millimeter, piring-

piring ini membawa minyak karena gesekan dan pengotor berat ditekan keluar.

### 3) Penyaringan (*Filtering*)

Dengan metode ini minyak disaring melalui kertas penyaring sehingga pengotor tidak dapat melalui pori-pori penyaring yang kecil, sementara embun atau uap diserap oleh kertas yang mempunyai *hygroscopicity* yang tinggi. Jadi *filter press* ini sangat efisien memindahkan pengotor padat dan uap dari minyak yang merupakan kelebihan dari pada alat sentrifugal. Walaupun cara ini sederhana dan lebih mudah untuk dilakukan, keluaran yang dihasilkan lebih sedikit jika dibandingkan dengan alat sentrifugal yang menggunakan kapasitas motor penggerak yang sama. Filter press ini cocok digunakan untuk memisahkan minyak dalam *circuit breaker* (CB), yang biasanya tercemari oleh partikel jelaga (arang) yang kecil dan sulit dipisahkan dengan menggunakan alat sentrifugal.

### 4) Regenerasi (*regeneration*)

Produk-produk penuaan tidak dapat dipindahkan dari minyak dengan cara sebelumnya. Penyaringan hanya untuk memindahkan bagian endapan yang masih tersisa dalam minyak. Semua sifat-sifat minyak yang tercemar dapat dipindahkan dengan pemurnian menyeluruh yang khusus yang disebut regenerasi.

Dalam menggunakan *absorben* untuk regenerasi minyak transformator sering dipakai di gardu induk dan pembangkit. *Absorben* adalah substansi yang partikel-partikelnya dapat menyerap produk-produk penuaan dan kelembaban pada permukaannya. Hal yang sama dilakukan *absorben* dalam ruang penyaring tabung gas menyerap gas beracun dan membiarkan udara bersih mengalir. Regenerasi dengan *absorben* dapat dilakukan lebih menyeluruh bila minyak dicampuri dengan asam sulfur.

Ada dua cara merawat minyak dengan *absorben* yaitu :

- Pertama, minyak yang dipanasi dapat dicampuri secara menyeluruh dengan *absorben* yang dihancurkan dan kemudian disaring.
- Kedua, minyak yang dipanaskan dapat dilewatkan melalui lapisan tebal *absorben* yang disebut perkolasi.

*Absorben* untuk regenerasi minyak transformator terdiri dari selinder yang dilas dengan lubang pada dasarnya dimana *absorber* ditempatkan dengan minyak yang dipanaskan (80-100 °C) hingga mengalir ke atas melalui *absorber*. Ketika minyak mengalir ke atas, filter tersumbat oleh partikel halus *absorber* dan udara dibersihkan dari *absorber* lebih cepat dan lebih menyeluruh pada awalnya. *Absorber* yang digunakan untuk regenerasi minyak transformator kebanyakan yang terbuat *silica gel* dan

alumina atau sejenis tanah liat khusus yang dikenal sebagai pemutih (*bleaching earth*), lempung cetakan (*moulding clay*).

Transformator tentunya harus diistirahatkan (*deenergized*) ketika minyaknya akan dimurnikan atau diregenerasi dengan salah satu metode di atas, walaupun demikian hal di atas dapat dilaksanakan dalam keadaan berbeban jika dilakukan perlakuan khusus. Pengembangan metode regenerasi minyak transformator dalam keadaan berbeban adalah dengan filter pemindahan pemanas (*thermal siphon filter*) yang dihubungkan dengan tangki minyak transformator. Filter ini diisi dengan *absorben* sebanyak 1% dari berat minyak transformator.

#### e. Pengukuran Konduktivitas Arus Searah Minyak Transformator

Konduktivitas minyak ( $k$ ) sangat tergantung pada kuat medan, suhu dan pengotoran. Nilai konduktivitas diakibatkan oleh pergerakan ion. Pengukuran  $k$  dapat menunjukkan tingkat kemurnian minyak transformator.

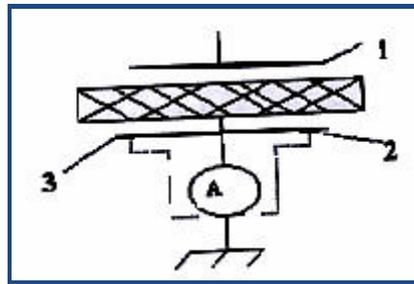
Penguraian pengotor elektrolitik menghasilkan ion positif dan negatif. Untuk satu jenis ion dengan muatan  $q_1$  dengan rapat ion  $n_1$  maka kontribusi rapat arus ditimbulkan pada kuat medan  $E$  yang tidak terlalu tinggi adalah:

$$S_1 = q_1 n_1 v_1 \quad (2-1)$$

$$S_1 = q_1 n_1 E \quad (2-2)$$

$v_1$  dan  $n_1$  adalah kecepatan dan mobilitas ion. Mobilitas ion akan bernilai konstan hanya jika berlaku hukum Ohm. Jika terdapat kuat medan tertentu dalam medan dielektrik, maka akan berlangsung mekanisme kompensasi yang menyeimbangkan kerapatan berbagai jenis ion hingga tercapai keseimbangan antara penciptaan, rekombinasi serta kebocoran ion terdapat elektroda-elektroda. Karena mobilitas ion yang berbeda, maka mekanisme juga berlaku dengan laju yang berbeda pula sehingga nilai  $k$  merupakan fungsi waktu. Oleh karena itu dalam mengukur nilai  $k$  dianjurkan untuk menunggu beberapa saat misalnya 1 menit hingga mekanisme transient hilang.

Susunan elektroda yang digunakan dalam mengukur nilai  $k$  harus dilengkapi dengan elektroda cincin pengaman untuk menghilangkan pengaruh pada bidang batas dan arus permukaan yang dibumikan secara langsung.



Gambar II.92  
Susunan elektroda untuk tegangan searah

Keterangan gambar:

1. Elektroda tegangan tinggi
2. Elektroda ukur
3. Elektroda cincin pengaman

Medan elektrik sedapat mungkin dibuat homogen. Disamping elektroda pelat umumnya digunakan elektroda silinder koaksial. Jika diterapkan tegangan  $U$  untuk medan homogen seluas  $A$  dan besar sel  $S$  maka nilai  $k$  dapat dihitung dari nilai arus  $I$  sebagai berikut:

$$K = (LS)/U A \quad (2-3)$$

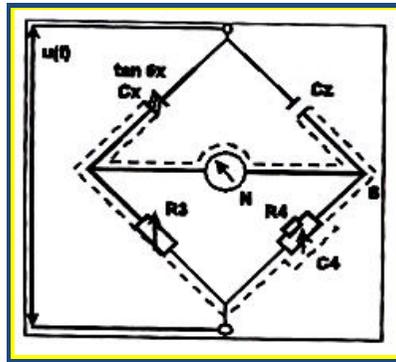
Arus yang terukur umumnya berkisar beberapa kiloampere. Untuk itu dapat digunakan galvanometer kumparan putar yang peka ataupun pengukur arus dengan penguat elektronik yang jauh lebih peka.

#### f. Pengukuran Faktor Dissipasi Minyak Transformator

Rugi dielektrik dari suatu isolasi dengan kapasitas  $C$  pada frekuensi jala-jala ? dapat dihitung dengan menggunakan faktor disipasi sebagai berikut:

$$P_{\text{diel}} = U^{2w} C \tan d \quad (2-4)$$

Besar rugi dielektrik dapat diukur dengan jembatan *Schering*.



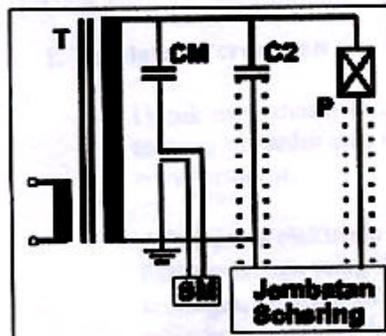
Gambar II.93

Jembatan *Schering* Rangkaian untuk mengukur kapasitansi dan faktor disipasi dengan jembatan *Schering*

Kapasitas  $C_x$  dan faktor disipasi  $\tan d$  harus diukur sebagai fungsi tegangan uji  $U$  dengan menggunakan rangkaian di atas. Tegangan yang dibangkitkan oleh transformator tegangan tinggi  $T$  diukur dengan kapasitor  $CM$  dan alat ukur tegangan puncak  $SM$ . Tabung uji diparalelkan dengan kapasitor standar dengan nilai kapasitansi  $C_2 = 28 \text{ pF}$ .

#### g. Tembusan jembatan serat dalam minyak isolasi

Setiap bahan isolasi cair mengandung pengotor makroskopik berupa partikel serta selulosa, kapas dan lain sebagainya. Jika partikel itu menyerap embun maka akan bekerja gaya yang bergerak menuju daerah dengan kuat medan yang lebih tinggi dan mengarahkannya sesuai dengan arah medan  $E$ . Muatan dengan polaritas yang berlawanan akan diinduksikan pada ujung-ujungnya sehingga mengarah mengikuti arah medan. Keadaan ini menciptakan saluran konduktif yang menjadi panas akibat rugi resistif sehingga menguapkan embun yang terkandung dalam partikel. Tembus kemudian terjadi pada tegangan yang relatif rendah yang digambarkan sebagai tembus *thermal* lokal pada bagian yang cacat.



Gambar II.94  
Jembatan *Schering*

#### **h. Prosedur Pengujian Tegangan Gagal Minyak Transformator dengan Berbagai Macam Elektroda**

Berbagai macam elektroda yang digunakan untuk pengetesan ini dimaksudkan untuk mendapatkan hasil pengujian kegagalan minyak transformator dalam keadaan volume minyak tertekan, medan seragam dan tak seragam.

##### **1) Pemrosesan Minyak Transformator (*Oil Processing*)**

Kekuatan dielektrik dari minyak transformator sangat dipengaruhi oleh pemrosesan dan kondisi pengujian, karena menentukan kualitas dari minyak transformator selama pengujian. Sifat minyak akan hilang melalui uap lembab, gas, ketidakmurnian, dan pengisian kedalam tangki pengujian. Kualitas minyak harus dicek secara periodik dengan *oil cup tester*, sehingga dapat diperoleh informasi bahwa pengurangan kekuatan elektrik dari minyak transformator diabaikan jika tangki ditutup 4 hari. Jika kekuatan dielektrik minyak menurun dari nilai awal 65 kV/25 mm sampai 55 kV/ 2.5 mm, atau jika lebih dari 4 hari setelah diisi minyak, maka minyak harus diganti.

##### **2) Penerapan Tegangan**

Tegangan AC dan tegangan impuls biasanya digunakan dalam pengujian, Pengujian dengan tegangan AC dapat diperoleh dengan *Steady voltage raising method* dan *Withstand voltage method*, dengan kenaikan dari 5 sampai 10 % step, mulai 60 % dari ekspektasi *breakdown voltage*. Impuls voltage dibuat dengan *up and down method* dari 5 sampai 10 % step dari ekspektasi *breakdown voltage*.

Probabilitas pengujian kegagalan dapat diperoleh dalam 2 cara yaitu:

- Tegangan AC naik pada kegagalan dengan kecepatan konstan 3 kV/sec. Prosedur ini diulang sampai 500 kali dalam interval 1 menit.
- *Voltage band* antara 0 sampai 100 % *breakdown voltage*, yang dibagi dalam beberapa level. Tegangan AC telah diaplikasi selama 1 menit 20 kali tiap *level* tegangan, sedangkan tegangan impuls telah diaplikasi 20 kali tiap *level* tegangan.

#### **i. Analisis Kegagalan Minyak Transformator**

Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan dielektrik minyak transformator antara lain fenomena stabilisasi, perawatan sebelum penggunaan minyak dan elektroda, pengaruh kecepatan minyak, pengaruh kapasitas paralel terhadap sel pengujian, dan pengaruh daerah elektroda dan jarak celah.

### 1) Peralatan percobaan

Untuk memahami analisis yang dilakukan terlebih dahulu meninjau sekilas tentang prosedur dan alat percobaan yang dipakai dalam kegagalan minyak transformator.

Ada 3 jenis elektroda yang sering digunakan dalam percobaan yaitu Elektroda baja yang ringan dan kecil (berdiameter 10 mm), Elektroda kuningan–Bruce profil dengan luas daerah yang datar dan elektroda baja silindris koaksial dengan jarak celah dalam rentang yang lebar.

### 2) Prosedur pembersihan

Persiapan elektroda pertama-tama adalah pencucian dengan *trichloroethylene*, penggosongan permukaan secara standar dengan 1000 *grade* kertas silikon karbid, kemudian dicuci dalam campuran air panas dan larutan sabun, pengeringan dan pemindahan debu dengan karet busa sintetis, pembilasan dengan air panas dan air suling. Elektroda dikeringkan dalam kabinet berlainan udara yang bersekat-sekat dan akhirnya digosok dengan tissue kain tirus lensa dengan memakai *acetone* setelah itu memakai *trichloroethylene*. Sisa sambungan elektroda dicuci dengan air panas dan larutan sabun dan dibilas sesuai dengan prosedur diatas tiap kali setelah pengujian

### 3) Pengujian Elektrik

Semua pengujian dilakukan dengan gelombang sinus tegangan Ac dengan frekuensi 5 Hz. Tegangan yang diberikan dinaikan secara seragam dalam semua pengujian dengan harga rata-rata 2 kV/detik. Sebuah CB dihubungkan ke sisi primer transformator dengan tujuan untuk memutus arus gangguan yang jika arus gangguan dibiarkan terlalu lama akan mengakibatkan karbonisasi dan akan melubangi elektroda

## 6. Pemeriksaan Transformator

Pemeriksaan transformator tenaga dilaksanakan tahunan dalam keadaan tidak beroperasi. Komponen dan cara pemeriksaan transformator tenaga ditunjukkan pada Tabel II.1 di bawah ini:

Tabel II.1

Komponen dan cara pemeriksaan transformator tenaga

No.	Peralatan/komponen	Cara pelaksanaan
1	Pondasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa apakah ada keretakan dan perubahan kedudukan.</li> <li>• Memeriksa penahan roda apakah masih tetap kokoh pada tempatnya (untuk kapasitas transformator kecil).</li> <li>• Memeriksa apakah isolasi antara tangki terhadap tanah masih baik.</li> </ul>
2	Pipa minyak dan pipa air	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membersihkan kotoran dan minyak yang melekat.</li> <li>• Memperbaiki bila ada getaran yang berlebihan dan kerusakan mur/baut yang kendur.</li> <li>• Memeriksa penyebab suara yang tidak normal.</li> <li>• Memperbaiki pipa minyak, pipa air, katup dan sumbat-sumbat yang bocor.</li> </ul>
3	Pompa-pompa minyak	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa pompa untuk sirkulasi apakah keadaannya baik (dapat beroperasi).</li> </ul>
4	Kipas pendingin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa, motor-motor kipas pendingin, bila perlu bantalan dan pelumasnya di ganti.</li> </ul>
5	Alat pengatur gas dan relai-relai	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa <i>setting</i> dan kerja dari regulator dan relay apakah pengukurannya masih menunjukkan sempurna.</li> </ul>
6	<i>Bushing</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membersihkan porselen dengan air atau <i>carbon tetra chloride</i>.</li> <li>• Memperbaiki bagian-bagian yang lecet dengan mengecatkan lacquer.</li> <li>• Memeriksa dan mengeraskan apabila ada mur/baut yang kendur.</li> <li>• Memeriksa perapat, dan bila bocor di ganti dengan yang baru.</li> </ul>
7	Terminal utama dan pentanahan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengeraskan semua baut penghubung terminal ke rel.</li> <li>• Memeriksa dan mengencangkan bila terdapat baut sambungan tanah yang kendur atau putus.</li> </ul>

No.	Peralatan/komponen	Cara pelaksanaan
8	Tahanan isolasi belitan transformator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa tahanan isolasi antara belitan-belitan dan antara belitan ke tanah.</li> <li>• Memeriksa yang sama perlu di lakukan dengan menggunakan jembatan kapasitansi.</li> </ul>
9	Sumber tenaga dan sistem pengawatan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa semua pengawatan, saklar, pengaman lebur dari sumber tenaga, kontrol dan alarm apakah dalam keadaan baik.</li> </ul>
10	Katup-katup dan sumbat-sumbat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mencoba katup-katup penghubung untuk memeriksa apakah dalam keadaan beroperasi baik dan pastikan katup posisi terbuka.</li> </ul>
11	Indikator tinggi minyak dan relainya	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membersihkan gelas penduga/kaca indicator yang kotor.</li> <li>• Memeriksa indikator tinggi permukaan minyak dan relai-relai agar dapat bekerja dengan sempurna.</li> </ul>
12	Alat penafasan dan ventilasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa alat pernafasan dan ventilasi apakah masih dalam keadaan nomal.</li> <li>• Memeriksa pada alat pernafasan dari bahan kimia dan mengganti dengan yang baru atau memanaskan lagi bila sudah mengalami perubahan warna atau bentuk.</li> </ul>
13	Diafragma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa diapragma apakah dalam kondisi baik dan menutup rapat.</li> <li>• Pada diafragma tipe tidak hancur, di periksa apakah tertutup oleh karat atau cat.</li> </ul>
14	Indikator temperatur dan relai-relai	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa, dan kalibrasi ulang pada temperatur indicator dan relai-relai.</li> <li>• Memeriksa, dan membersihkan pada kontak- kontak relay dan pada penggerak mekanik.</li> </ul>
15	Pipa gas dan katup	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa kebocoran gas dengan menggunakan air sabun pada sambungan, katup penghubung, dst. Dengan menaikkan tekanan gas sampai maksimum sesuai dengan yang di sarankan oleh pabrik.</li> </ul>
16	CT bushing dan peralatan tegangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa tahanan isolasi dan pengawatan.</li> <li>• Memeriksa dan mengeraskan hubungan terminal termasuk tap alat potensial ke dalam bushing.</li> </ul>

No.	Peralatan/komponen	Cara pelaksanaan
17	Motor penggerak <i>tap changer</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa motor penggerak, bila perlu bantalan dan pelumasnya diganti.</li> <li>• Memeriksa, dan mengatur kembali remnya.</li> <li>• Memeriksa roda gigi, poros dan pelumasnya.</li> </ul>
18	Perlengkapan <i>limit switch tap changer</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa pegas kontak, tangkai penggerak dan tuas.</li> <li>• Memeriksa keadaan kontak-kontak dan memperbaiki bila terjadi hangus/korosi dengan menggunakan contact cleaner.</li> </ul>
19	Posisi <i>indicator tap changer</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa apakah posisi yang di tunjuk sudahsesuai dengan posisi dari kontak utama.</li> <li>• Memeriksa gerakan dapat penunjukkannya apakah ada yang menghalangi</li> </ul>
20	Pemeriksaan kadar asam, kadar air dan kotoran, warna dan Kekentalan yang terkandung dalam minyak	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengambil contoh minyak dan di periksa di Laboratorium.</li> </ul>
21	Pemadam kebakaran	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memeriksa katup-katup sumber air, tekanan air, alat pancar dan alat otomatis apakah dalam keadaan baik.</li> <li>• Mencoba sistem air pancar dan memperhatikan</li> </ul>

Pembahasan mengenai pemeliharaan transformator lebih lanjut pada Bab X pada buku ini.

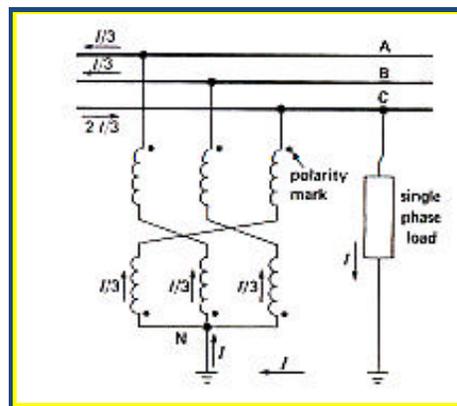
### I. Penumbumian bagian-bagian Instalasi

Penumbumian sesungguhnya sama dengan pentanahan, hanya untuk bagian-bagian instalasi tertentu yang ditanahkan digunakan istilah penumbumian untuk menekankan perlunya bagian-bagian instalasi tersebut mempunyai potensial yang sama dengan bumi melalui penumbumian demi keselamatan manusia.

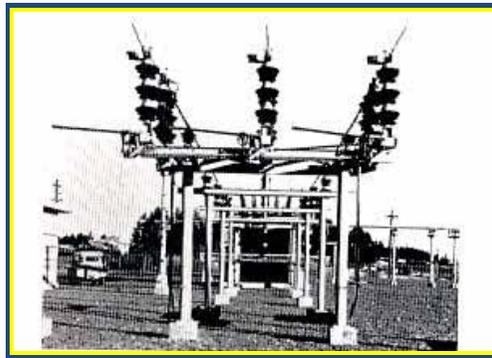
Bagian-bagian dari instalasi pusat listrik yang harus dibumikan adalah bagian-bagian yang terbuat dari logam (penghantar) dan berdekatan (hanya dipisahkan oleh isolasi listrik) dengan bagian instalasi yang bertegangan, seperti: generator, saklar-saklar, kabel, rel, dan kumparan transformator. Bagian-bagian yang perlu dibumikan, misalnya: badan (*body*) generator, badan transformator, kerangka besi penyangga kabel, kerangka besi penyangga rel, dan panel.

Penumbumian bagian-bagian instalasi tersebut di atas dilakukan dengan cara menghubungkan bagian-bagian ini dengan titik-titik penumbumian dalam pusat listrik bersangkutan. Titik-titik penumbumian ini dapat berupa batang besi, pelat tembaga, atau anyaman tembaga yang ditanam dalam tanah.

Dengan melakukan penumbumian bagian-bagian instalasi tersebut di atas, maka tegangan bagian-bagian instalasi ini akan selalu sama dengan potensial bumi sehingga apabila disentuh manusia tidak berbahaya.



Gambar II.95  
Pentanahan pada Transformator 3 Phasa

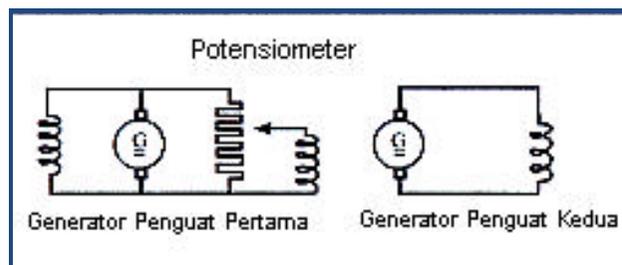


Gambar II.96  
Pentanahan pada Transformator 3 Fasa

### J. Sistem Excitacy

Gambar II.97 menunjukkan rangkaian listrik *excitacy* dari generator besar (di atas 50 MVA) dengan menggunakan 2 tingkat generator arus penguat (*exciter*).

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan *shunt* yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.



Gambar II.97  
Pengaturan tegangan generator utama dengan potensiometer

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus *excitacy* (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut.

Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya

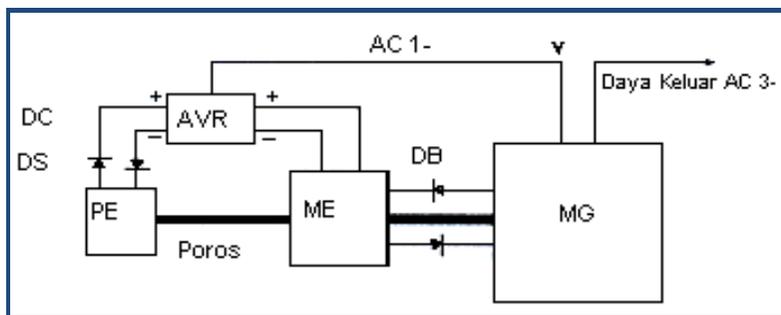
(dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar.

PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator. Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah.

Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Pengaturan tegangan otomatis pada awalnya berdasarkan prinsip mekanis, tetapi sekarang sudah menjadi elektronik. Perkembangan sistem *excitacy* pada generator sinkron dengan sistem *excitacy* tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi.

Untuk menghilangkan sikat digunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar. Gambar II.98 menunjukkan sistem *excitacy* tanpa sikat.



Gambar II.98  
Sistem *Excitacy* Tanpa Sikat

**Keterangan**

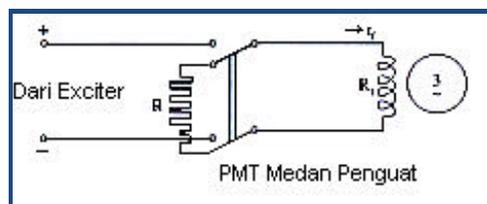
ME	:	Main Exiter
MG	:	Main Generator
AVR	:	Automatic Voltage Regulator
V	:	Tegangan Generator
AC	:	Alternating Current (arus bolak balik)
DC	:	Direct Current (arus searah)

Sistem pemberian arus penguatan yang digunakan pada pembangkit besar (di atas 100 MVA). Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama.

*Pilot exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator *main exciter*. Besar arus searah yang mengalir ke kutub *main exciter* diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*automatic voltage regulator/AVR*).

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan *main exciter* maka besarnya arus *main exciter* juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama. Pada sistem *excitacy* tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi.

Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.



Gambar II.99

PMT Medan Penguat dengan Tahanan R

Pendeteksian kejadian pada rotor yang berputar perlu cara khusus, antara lain menggunakan cara mentransmisikan dari sesuatu yang berputar.

Pada cara ini, rotor dilengkapi pengirim sinyal elektronik yang mewakili besaran tertentu, misalnya mewakili tahanan isolasi rotor.

Sinyal elektronik ditangkap oleh alat pengukur di tempat yang diinginkan dan sinyal-sinyal elektronik oleh alat pengukur "diterjemahkan" menjadi sinyal yang mudah dimengerti.

Sistem *excitacy* generator utama (*main generator*) harus bisa dibuka oleh pemutus tenaga (PMT). Hal ini berkaitan dengan sistem proteksi generator, misalnya apabila relai diferensial dari generator bekerja maka relai membuka PMT generator dan juga membuka PMT sistem *excitacy* generator.

PMT yang membuka sistem penguat generator melakukan pemutusan arus yang mengalir ke medan magnet generator.

Tahanan R untuk menampung energi sehingga busur listrik pada kontak-kontak PMT medan penguat dapat padam tanpa merusak kontak-kontak.

## K. Sistem Pengukuran

Gambar II.98 menunjukkan diagram pengukuran pada generator dan pada saluran. Besaran yang diukur pada adalah:

### 1. Tegangan listrik

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

### 2. Arus

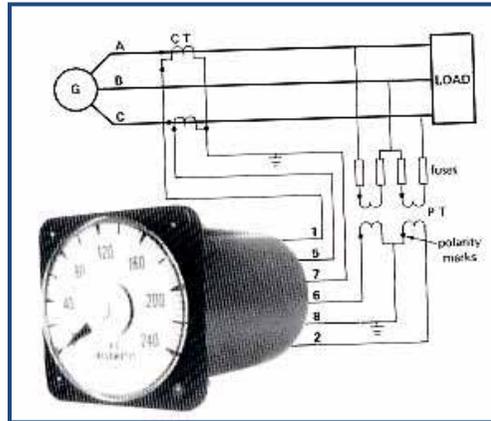
Pengukuran arus diperlukan untuk mengamati perubahan berbagai alat, jangan sampai mengalami pembebanan lebih.

### 3. Daya Aktif

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

#### 4. Daya Reaktif

Daya reaktif diukur dalam Volt Ampere Reaktif (VAR) atau *Megga Volt Ampere Reactive (MVAR)*. Pengukuran diperlukan untuk mengetahui kemampuan generator penguat dan pengaturan tegangan.



Gambar II.100

Pengukuran daya aktif pada rangkaian tegangan tinggi

#### 5. Energi-Listrik

Energi listrik diukur dalam kWh atau MWh. Pengukuran diperlukan untuk menyusun neraca tenaga dan berkaitan dengan pemakaian bahan bakar.

#### 6. Sudut fasa ( $\cos \phi$ )

Untuk mengukur besar  $\cos \phi$  dan mengetahui keadaan *lagging* atau *leading* sehingga dapat diketahui apakah generator menghasilkan atau menyerap daya reaktif.

#### 7. Frekuensi

Diperlukan untuk memparalelkan generator dan menjaga mutu penyediaan tenaga listrik.

Cara pengukuran dan jenis alat ukur lebih lanjut dibahas pada Bab XIII buku ini

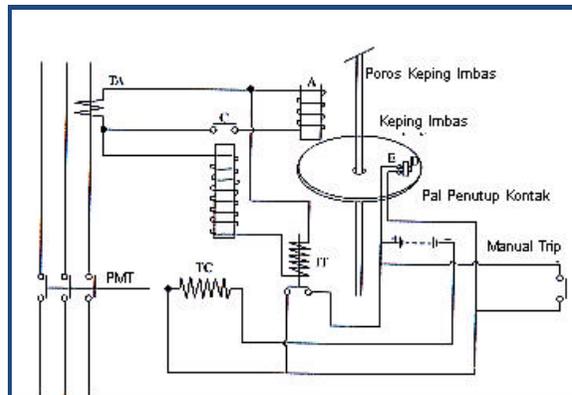
### L. Sistem Proteksi

Gangguan yang sering terjadi adalah hubung singkat antar fasa atau antara fasa dengan tanah dan keduanya.

Gangguan hubung singkat dapat menimbulkan arus besar yang dapat merusak peralatan sehingga diperlukan sistem pengamanan atau sistem proteksi.



Alat pendeteksi gangguan berupa relai. Relai memberi perintah kepada *trip coil*, yaitu kumparan yang apabila bekerja akan menggerakkan pembukaan pemutusan tenaga (men-*trip* PMT) membebaskan tegangan dari bagian instalasi yang terganggu dan arus gangguan hubung singkat yang terjadi dapat merusak peralatan telah dihilangkan.



Gambar II.102

Bagan rangkaian listrik untuk sistem proteksi

Keterangan

A = Kumparan induksi;

TA = Transformator arus;

B = Elektromagnet untuk menutup kontak C

C = Kontak penutup rangkaian kumparan induksi;

D = Pal penutup kontak yang terletak pada keping induksi, berputar bersama keping induksi;

E = Kontak-kontak yang ditutup oleh Pal D

TC = *Trip Coil* yang menjatuhkan PMT

IT = *Instantaneous Trip*

b. Relai-relai dalam sistem proteksi generator terdiri dari:

1) Relai Arus lebih

Berfungsi mendeteksi arus lebih yang mengalir pada kumparan stator generator. Arus lebih dapat terjadi pada kumparan stator generator atau dalam kumparan rotor. Arus lebih pada kumparan stator juga dapat terjadi karena beban yang berlebihan pada generator.

2) Relai Diferensial

Berfungsi mendeteksi gangguan dalam kumparan stator generator dan harus bekerja lebih cepat daripada relai arus lebih. Prinsip kerja relai diferensial adalah membandingkan arus yang masuk dan keluar dari kumparan stator generator.

Jika ada selisih, berarti ada gangguan dalam kumparan stator generator dan selisih arus akan menggerakkan relai diferensial.

### 3) Relai gangguan hubung tanah

Gangguan hubung tanah adalah gangguan yang paling banyak terjadi. Arus gangguan hubung tanah yang terjadi belum tentu cukup besar untuk dapat menggerakkan relai arus lebih, sehingga harus ada relai arus hubung tanah yang 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 tanah dipasang pada rangkaian stator melalui transformator 3 fasa.

Jika tidak terjadi gangguan hubung tanah, jumlah arus pada ketiga fasa transformator sama dengan 0 (nol), tapi jika ada gangguan hubung tanah jumlahnya tidak sama dengan 0 (nol) dan relai bekerja.

Relai akan mendeteksi gangguan yang terjadi pada rangkaian stator generator. Untuk pendeteksian gangguan hubung tanah yang terjadi pada stator generator saja dipakai relai hubung tanah terbatas. Jumlah arus dari 3 fasa dijumlahkan lagi dengan arus yang dideteksi trafo arus pada penghantar pentanahan titik netral generator. Relai hubung tanah terbatas merupakan relai diferensial khusus untuk gangguan hubung tanah.

### 4) Relai rotor hubung tanah

Hubung tanah pada rangkaian rotor, yaitu hubung singkat antara konduktor rotor dengan badan rotor dan dapat menimbulkan getaran (vibrasi) berlebihan pada generator.

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

Penguatan yang hilang dapat menimbulkan panas berlebihan pada kepala kumparan stator dan lemahnya sistem penguatan pada generator sinkron dan dapat menyebabkan generator menjadi lepas dari hubungan sinkron dengan generator lainnya.

Dalam keadaan lepas sinkron, generator yang penguatannya lemah masih diberi kopel pemutar oleh mesin penggerak sehingga generator ini berubah menjadi generator asinkron.

Akibatnya terjadi panas berlebihan pada rotor generator sinkron karena tidak direncanakan untuk beroperasi asinkron dan harus dicegah oleh relai penguatan hilang. Prinsip kerja relai ini adalah mengukur impedansi kumparan stator generator. Dalam keadaan penguatan hilang, impedansi kumparan stator akan terukur kecil dan relai penguatan hilang akan bekerja.

#### 6) Relai tegangan lebih.

Tegangan lebih dapat terjadi jika generator berbeban kemudian pemutusan tenaganya (PMTnya) *trip* karena salah satu atau beberapa relai bekerja.

Tegangan lebih dapat merusak isolasi generator termasuk dan isolasi kabel penghubung. Harus dicegah dengan menggunakan relai tegangan lebih.

Prinsip kerjanya adalah mendeteksi tegangan antar fasa melalui transformator tegangan. Apabila tegangan melampaui batas tertentu, maka relai akan men-*trip* PMT generator dan PMT medan penguat (magnet) generator.

### M. Perlindungan Terhadap Petir

Pusat pembangkit listrik umumnya dihubungkan dengan saluran udara transmisi yang menyalurkan tenaga listrik ke pusat-pusat konsumsi tenaga listrik, yaitu gardu-gardu induk (GI).

Saluran udara rawan terhadap sambaran petir yang menghasilkan gelombang berjalan (surja tegangan) yang dapat masuk ke pusat pembangkit listrik. Oleh karena itu, dalam pusat listrik harus ada *lightning arrester* (penangkal petir) yang berfungsi menangkal gelombang berjalan dari petir yang akan masuk ke instalasi pusat pembangkit listrik. Gelombang berjalan juga dapat berasal dari pembukaan dan penutupan pemutus tenaga (*switching*). Pada sistem Tegangan Ekstra Tinggi (TET) yang besarnya di atas 350 kV, surja tegangan yang disebabkan oleh *switching* lebih besar dari pada surja petir. Saluran udara yang keluar dari pusat pembangkit listrik merupakan bagian instalasi pusat pembangkit listrik yang paling rawan sambaran petir dan karenanya harus diberi *lightning arrester*. Selain itu, *lightning arrester* harus berada di depan setiap transformator dan harus terletak sedekat mungkin dengan

transformator. Hal ini perlu karena pada petir yang merupakan gelombang berjalan menuju ke transformator akan melihat transformator sebagai suatu ujung terbuka (karena transformator mempunyai isolasi terhadap bumi/tanah) sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang.

Berarti transformator dapat mengalami tegangan surja dua kali besarnya tegangan gelombang surja yang datang. Untuk mencegah terjadinya hal ini, *lightning arrester* harus dipasang sedekat mungkin dengan transformator. *Lightning arrester* bekerja pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi untuk membuang muatan listrik dari surja petir dan berhenti beroperasi pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi agar tidak terjadi arus pada tegangan operasi, dan perbandingan dua tegangan ini disebut rasio proteksi *arrester*.

Tingkat isolasi bahan *arrester* harus berada di bawah tingkat isolasi bahan transformator agar apabila sampai terjadi *flashover*, maka *flashover* diharapkan terjadi pada *arrester* dan tidak pada transformator. Transformator merupakan bagian instalasi pusat listrik yang paling mahal dan rawan terhadap sambaran petir, selain itu jika sampai terjadi kerusakan transformator, maka daya dari pusat listrik tidak dapat sepenuhnya disalurkan dan biayanya mahal serta waktu untuk perbaikan relatif lama.

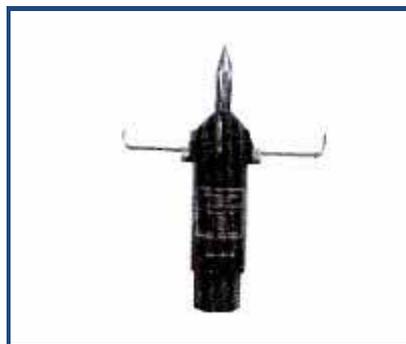
Salah satu perkembangan dari *lightning arrester* adalah penggunaan oksida seng  $ZnO_2$  sebagai bahan yang menjadi katup atau *valve arrester*. Dalam menentukan rating arus *arrester*, sebaiknya dipelajari statistik petir setempat. Misalnya apabila statistik menunjukkan distribusi probabilitas petir yang terbesar adalah petir 15 kilo Ampere (kA), maka *rating arrester* diambil 15 kilo Ampere.

Gambar II.103 menunjukkan konstruksi sebuah *lightning arrester* buatan *Westinghouse* yang menggunakan celah udara (*air gap*) di bagian atas.



Gambar II.103

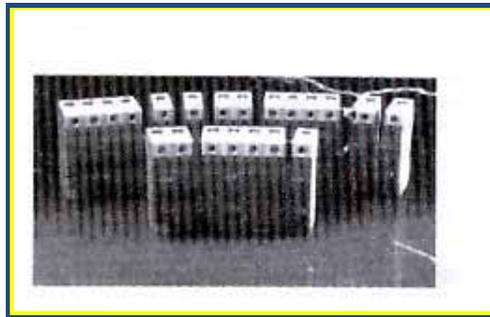
Konstruksi sebuah *lightning arrester* buatan *Westinghouse* yang menggunakan celah udara (*air gap*) di bagian atas



Gambar II.104

*Lightning Arrester* Tegangan Rendah Untuk Dipasang di Luar Gedung

*Arrester* ini bisa dipasang pada bangunan gedung atau di dekat alat yang perlu dilindungi misalnya pada komputer. Alat yang dilindungi perlu tidak saja dilindungi terhadap sambaran petir secara langsung, tetapi juga terhadap sambaran tidak langsung yang menimbulkan induksi.



Gambar II.105

*Lightning Arrester* Tegangan Rendah untuk Dipasang di dalam Gedung

#### **N. Proteksi Rel (*Busbar*)**

Rel (*busbar*) pada pusat listrik merupakan bagian instalasi yang vital, artinya apabila terjadi gangguan atau kerusakan pada rel akibatnya akan besar bagi operasi pusat listrik yang bersangkutan karena daya menjadi tidak dapat disalurkan. Apabila kejadian seperti ini terjadi pada pusat listrik yang besar dalam sistem interkoneksi, maka hal ini dapat mengganggu seluruh sistem interkoneksi. Oleh karena itu, gangguan apalagi kerusakan pada rel harus sedapat mungkin dihindarkan. Di lain pihak, rel yang keadaannya terbuka, rawan terhadap polusi debu atau uap air laut untuk pusat listrik yang terletak di tepi pantai. Pusat listrik yang besar umumnya terletak di tepi pantai karena membutuhkan air pendingin dalam jumlah yang besar dan juga memerlukan pasokan bahan bakar dalam jumlah besar di mana transportasi yang ekonomis dilakukan dengan kapal laut.

Mengingat hal tersebut di atas, maka harus ada langkah-langkah proteksi/perlindungan bagi rel agar tidak terjadi gangguan, yaitu dengan:

1. Memasang kawat petir yang mempunyai sudut perlindungan yang cukup terhadap rel (kurang dari  $30^{\circ}\text{C}$ ).
2. Memasang *lightning arrester* untuk saluran udara dan transformator dengan jarak yang cukup dekat.
3. Melakukan pentanahan/ pembedahan yang baik bagi semua struktur logam.
4. Memberi pagar yang rapat di sekeliling rel agar tidak ada binatang yang dapat masuk yang mungkin dapat menimbulkan gangguan, seperti: ayam, kambing, ular, dan sapi.

Jika sampai terjadi gangguan pada rel, maka proteksi yang khusus memproteksi rel adalah relai *busbar protection*. Prinsip kerjanya seperti relai diferensial yang mengukur selisih arus yang masuk dan keluar rel (*busbar*). Dalam keadaan ada gangguan di rel, selisih arus nilainya 0 sehingga relai akan bekerja membuka semua PMT yang berhubungan dengan rel yang terganggu tersebut.

## O. Instalasi Penerangan Bagian Vital

Penerangan pada pusat pembangkit listrik sangat penting, tanpa ada penerangan, maka jalannya operasi pusat listrik akan terganggu. Sehingga harus ada langkah-langkah konkrit dan maksimal agar pasokan daya untuk instalasi penerangan sedapat mungkin tidak pernah padam.

Langkah-langkah tersebut adalah:

- 1) Pasokan daya untuk instalasi penerangan diambil dari transformator pemakaian sendiri, bukan dari transformator unit pembangkit sehingga apabila unit pembangkit dihentikan atau mengalami gangguan, maka pasokan daya untuk instalasi penerangan tidak terganggu.
- 2) Menyediakan unit pembangkit darurat (bagi instalasi penerangan dan bagi keperluan lain yang vital seperti komputer untuk operasi).
- 3) Menyediakan instalasi listrik arus searah untuk sebagian penerangan yang sangat penting dengan menggunakan lampu arus searah.

Selain pasokan daya untuk penerangan yang memerlukan pasokan handal, bagian lain yang juga memerlukan pasokan daya handal adalah komputer untuk operasi, sistem proteksi termasuk pengencangan pegas *switchgear* PMT. Pada PLTU harus ada pasokan listrik arus searah yang digunakan untuk input motor arus searah yang digunakan memutar poros turbin uap pada saat mulai berputar.

Hal ini diperlukan apabila terjadi gangguan besar yang menyebabkan semua unit *trip* dan pasokan daya dari luar pusat listrik hilang dan juga akan menyebabkan berhentinya poros turbin uap yang sebelumnya berbeban (suhunya ratusan derajat Celcius) sehingga akan menjadi bengkok apabila mendingin (mengkerut) tanpa diputar.

Arus searah dari baterai aki juga diperlukan untuk sarana telekomunikasi yang banyak digunakan pada saat terjadi gangguan. Oleh karena itu, sebaiknya ada unit pembangkit darurat kecil yang dapat dan perlu dioperasikan pada waktu terjadi gangguan besar, paling sedikit dapat untuk melayani keperluan di atas termasuk untuk mengisi baterai aki.

## P. Instalasi Telekomunikasi

Telekomunikasi merupakan sarana operasi yang sangat penting bagi pusat listrik, terutama jika pusat listrik bekerja dalam sistem interkoneksi. Sarana telekomunikasi yang biasa digunakan dalam pusat pembangkit listrik adalah:

1. Telepon umum, termasuk: *Faximile*, *telex*, dan *electronic mail*.
2. *Power line carrier*, untuk komunikasi suara dan untuk pengiriman data, termasuk untuk proteksi sistem.
3. Serat optik yang dapat mengambil alih fungsi telepon umum maupun *power line carrier*.

Jika pusat listrik beroperasi pada sistem interkoneksi, maka komunikasi operasional antara pusat listrik dengan pusat pengatur beban (*operator system*) sangat penting. Jika alat supervisi sistem atau yang lazimnya disebut sebagai *supervisory control and data aquisition* (SCADA) dari pusat pengatur beban menggunakan komputer, maka pada pusat listrik harus ada *microprocessor* yang dapat berkomunikasi dengan komputer SCADA. *Microprocessor* ini dilengkapi dengan berbagai modem dan peripheral yang disebut *remote terminal unit* (RTU).

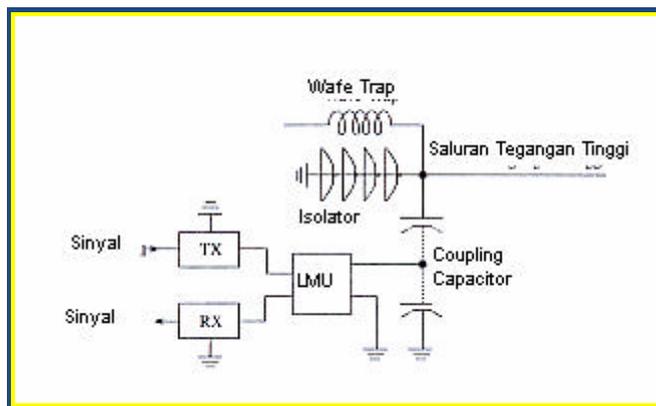
RTU mencatat berbagai data dan kejadian dari pusat listrik untuk dilaporkan ke komputer SCADA yang ada di pusat pengatur beban. Pusat pengatur beban melalui komputer SCADA dapat meminta data dan informasi berbagai kejadian yang dialami pusat listrik. Pusat pengatur beban juga dapat mengirim sinyal pengaturan ke pusat listrik, misalnya sinyal untuk membuka atau menutup PMT atau sinyal untuk mengatur beban unit pembangkit dalam rangka pembagian beban yang ekonomis dan atau dalam rangka pengaturan sistem frekuensi.

*Power Line Carrier* (PLC) adalah sistem telekomunikasi yang menggunakan saluran transmisi sebagai media pengiriman sinyal. Modulasi yang digunakan adalah *amplitude modulation single side band* (AMSSB) dengan frekuensi *carrier* (pembawa) sekitar 4,00 kilo Hertz. Prinsip kerja telekomunikasi PLC ini digambarkan secara skematik oleh Gambar II.106.

Hubungan sirkuit telekomunikasi dari pesawat SSB ke dalam saluran tegangan tinggi dilakukan melalui kapasitor penghubung (*coupling capacitor*) setelah terlebih dahulu melalui *line matching unit* (LMU) untuk menghasilkan daya maksimal. Untuk mencegah sinyal telekomunikasi yang berfrekuensi jauh di atas frekuensi tenaga listrik (50 Hertz) masuk ke dalam sirkuit pengukuran tenaga listrik, maka pada ujung saluran tegangan tinggi di GI sebelum masuk ke alat ukur tenaga listrik dipasang kumparan yang dalam bahasa Inggris disebut *wave trap*.

*Power line carrier* (PLC) umumnya mempunyai *channel* untuk komunikasi dan *channel* untuk data. *Channel* biasanya digunakan untuk SCADA dan *intertripping* relai proteksi.

*Remote terminal unit* (RTU) seperti digambarkan oleh Gambar II.107 terdiri dari *microprocessor* yang dilengkapi dengan *read only memory* (ROM) dan *random access memory* (RAM).



Gambar II.106  
Skematik prinsip kerja PLC

Keterangan:

TX = Transmitter dalam Unit SSB; RX = Receiver dalam Unit SSB;  
LMU = Line Matching Unit

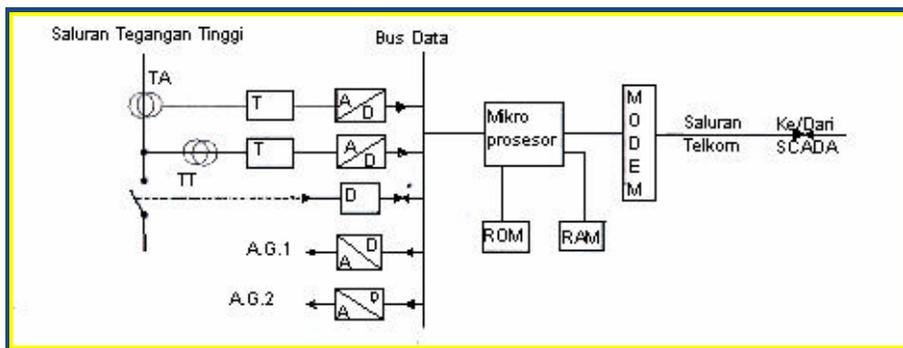
Di bagian *input* ada analog *input* yang berasal dari transformator arus dan transformator tegangan setelah terlebih dahulu melalui *transducer* dan *analog to digital converter*. Sedangkan di bagian digital *input* sinyal berasal dari posisi pemutus tenaga (PMT) membuka atau menutup. Di bagian *output* RTU ada *analog output* untuk mengatur posisi governor unit pembangkit. Sedangkan digital *output*-nya adalah untuk membuka atau menutup PMT.

Hubungan antara RTU dengan komputer SCADA dilakukan melalui modem telekomunikasi yang berhubungan dengan saluran telekomunikasi. Saluran telekomunikasi dapat berupa saluran tersebut dalam butir a, b, dan c pasal ini.

- Teknologi terakhir cenderung menggunakan serat optik yang umumnya dimiliki perusahaan listrik dan dipasang dalam kawat petir yang ada di alas saluran transmisi. Penggunaan saluran *fiber* memberi keuntungan karena jumlah *channel*-nya dapat lebih banyak daripada saluran *power line carrier*.

- Namun akhir-akhir sedang ada riset untuk dapat memanfaatkan sistem *power line carrier* bagi jangkauan yang lebih luas, yaitu dapat memasuki jaringan distribusi sampai ke rumah pelanggan listrik. Jika hal ini tercapai, maka jaringan tenaga listrik dapat juga berupa jaringan telekomunikasi dan jaringan sistem informasi.

Lebih lanjut uraian mengenai sistem telekomunikasi dibahas pada Bab XII.

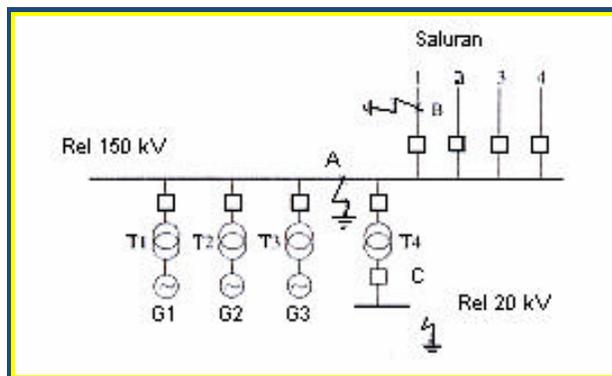


Gambar II.107

Diagram blok *remote terminal unit* (RTU)

Keterangan:

TA = Transformator Arus; TT = Transformator Tegangan; A/D = *Analog to Digital Converter*; D/A = *Digital to Analog Converter*; AO = *Analog Output*; D = *Digital Input - Output Unit*; ROM = *Read Only Memory*; RAM = *Random Access Memory*; T = *Transducer*



Gambar II.108

Contoh dari sebuah PLTU yang berdiri sendiri dengan 3 unit

Keterangan:

T = Transformator;

G = Generator;

A, B, C = Contoh-contoh lokasi gangguan

Gangguan hubung singkat disebabkan karena terjadi hubung singkat dalam satu bagian sistem. Bagian yang paling banyak mengalami gangguan adalah saluran udara. Gangguan hubung singkat menimbulkan arus hubung singkat yang besar dan harus diperhitungkan dalam merencanakan instalasi, khususnya dalam menentukan spesifikasi teknis pemutus tenaga (PMT).

### Q. Arus Hubung Singkat

Gambar II.108 menunjukkan contoh dari sebuah PLTU yang berdiri sendiri dengan 3 unit pembangkit yang sama: 3 x 80 MVA. Masing-masing unit memiliki transformator penaik tegangan ke 150 kV dengan kapasitas 80 MVA. Dari rel 150 kV ada 4 buah saluran keluar dan ada pasokan transformator pemakaian sendiri yang menurunkan tegangan ke 20 kV dan mempunyai kapasitas 25 MVA. Hubungan transformator penaik tegangan adalah A-Y (segitiga-bintang) dan transformator pemakaian sendiri adalah YY (bintang-bintang).

Karena ada 3 buah generator yang paralel, maka arus hubung singkat yang melalui PMT transformator pemakaian sendiri untuk gangguan di titik adalah 3 kalinya.

Perhitungan arus hubung singkat seperti di atas didasarkan atas gangguan simetris 3 fasa, karena dianggap gangguan ini yang menghasilkan arus hubung singkat terbesar. Tetapi gangguan yang paling sering terjadi adalah gangguan satu fasa ke tanah, khususnya pada saluran udara. Oleh karena itu, ada baiknya juga dilakukan pengecekan besarnya arus hubung singkat untuk gangguan satu fasa ke tanah khususnya di dekat pusat listrik besar yang transformator penaik tegangannya mempunyai titik netral yang ditanahkan secara langsung, karena dalam hal yang demikian, ada kemungkinan arus hubung singkat satu fasa ke tanah lebih besar daripada arus hubung singkat 3 fasa.

Pada hari-hari libur beban sistem rendah, unit-unit pembangkit banyak yang tidak dioperasikan ada kemungkinan arus hubung singkat menjadi turun dan tidak cukup untuk mengoperasikan relai apabila terjadi gangguan. Untuk mencegah kegagalan kerja relai, bila perlu diadakan penyetelan relai untuk arus hubung singkat yang lebih rendah.

Ada juga yang dipasang reaktor secara seri dengan alat tertentu, misalnya transformator untuk membatasi arus hubung singkat. Pembatasan arus hubung singkat di jaringan distribusi atau di instalasi pemakaian sendiri pusat listrik juga dapat dilakukan dengan tidak mengoperasikan paralel transformator di gardu induk (GI) atau

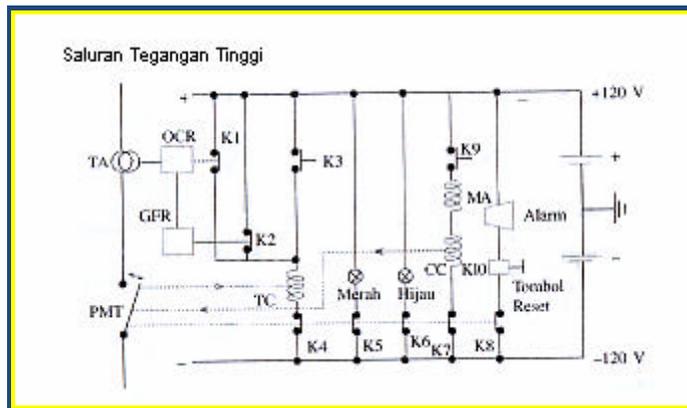
transformator pemakaian sendiri (bila lebih dari 1) pada pusat pembangkit listrik.

Spesifikasi PMT harus memperhatikan besarnya arus hubung singkat yang harus diputusnya dan juga harus memperhitungkan kemampuan *thermis*-nya dalam arti berapa lama PMT dapat dilalui oleh arus hubung singkat yang harus diputusnya. Hal ini berkaitan dengan penyetelan waktu tunda (*time delay*) relai.

## R. Pengawatan Bagian Sekunder

Pengawatan sekunder menggambarkan sirkuit listrik yang ada di sisi sekunder transformator arus dan transformator tegangan di sisi tegangan rendah. Arus dan tegangan yang berasal dari transformator arus dan transformator tegangan selain digunakan untuk pengukuran juga digunakan untuk mengoperasikan relai untuk guna keperluan proteksi. Relai kemudian menutup kontak-kontak dalam sirkuit arus searah dari baterai aki untuk men-*trip* PMT dan menyalakan lampu indikator serta membunyikan *alarm*.

Gambar II.109 menggambarkan pengawatan sekunder dari suatu penyulang (saluran keluar) yang diproteksi oleh relai arus lebih dan relai gangguan hubung tanah.



Gambar II.109

Pengawatan Sekunder dari Suatu Penyulang yang diproteksi Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Hubung Tanah

Keterangan:

Transformator Arus; TT = Transformator Tegangan; PMT = Pemutus Tenaga; OCR = Relai Arus Lebih; GFR = Relai Gangguan Tanah; TC = *Trip Coil*; CC = *Closing Coil*; MA = *Magnetic Alarm*; --- = hubungan mekanis; K3 dan K9 *normally open*.

Apabila ada gangguan arus lebih, maka relai OCR bekerja dan menutup kontak  $K_1$  sehingga trip coil TC bekerja men-*trip* PMT. Apabila timbul gangguan hubung tanah, di mana relai GFR bekerja dan menutup kontak  $K_2$ . Kontak  $K_3$  digunakan untuk men-*trip* PMT secara manual melalui pemberian arus ke *trip coil* TC.

Kontak  $K_9$  digunakan untuk memasukkan PMT melalui pemberian arus ke *closing coil* CC. Apabila PMT masuk, maka mekanisme PMT akan menutup kontak  $K_4$  untuk memungkinkan *trip coil* TC bekerja dan menutup kontak  $K_5$  untuk menyalakan lampu merah yang merupakan sinyal bahwa PMT masuk.

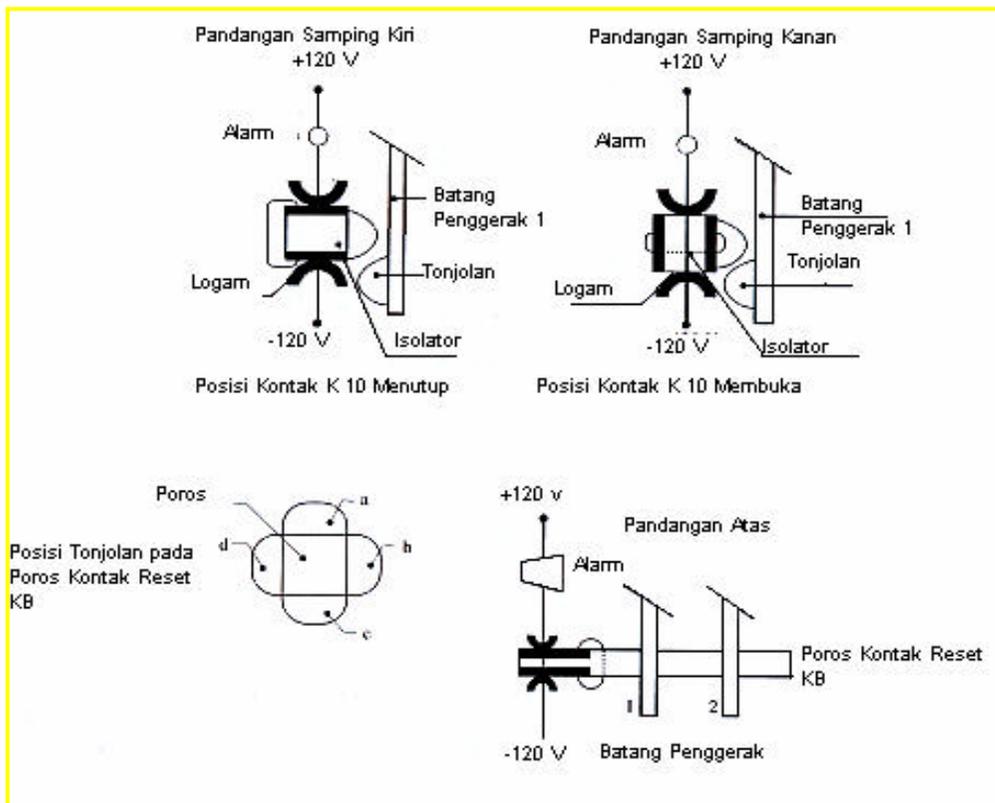
Apabila PMT *trip*, maka keadaan kontak-kontak karena adanya hubungan mekanis dengan PMT menjadi:

- Kontak  $K_4$  membuka untuk menghentikan/memutus arus yang lewat *trip coil* TC agar *trip coil* tidak terbakar.
- Kontak  $K_5$  membuka untuk mematikan lampu merah.
- Kontak  $K_6$  menutup untuk menyalakan lampu hijau yang merupakan sinyal bahwa PMT terbuka.
- Kontak  $K_7$  menutup untuk memungkinkan *closing coil* CC bekerja apabila kontak  $K_9$  ditekan. Kontak  $K_8$  menutup untuk membunyikan *alarm* sebagai tanda bahwa PMT *trip*. Kontak  $K_8$  harus dapat direset, artinya dapat dibuka secara mekanis tanpa mengganggu kedudukan kontak lainnya dan setelah direset untuk mematikan *alarm*, posisinya harus siap bekerja kembali apabila PMT *trip* lagi.

Kontak reset terdiri dari poros dan dua buah batang penggerak. Batang penggerak 1 digerakkan oleh tombol sedangkan batang penggerak 2 digerakkan oleh *magnetic alarm* MA yang dihubungkan seri dengan *Closing Coil* CC. Setiap batang penggerak mempunyai tonjolan yang akan menyeret tonjolan. Tonjolan a dan c diseret oleh tonjolan batang penggerak 1. Tonjolan b dan d diseret oleh tonjolan batang penggerak 2. Uraian ini menggambarkan fungsi batang-batang penggerak, yaitu: Batang penggerak 1 berfungsi menutup Kontak  $K_{10}$  agar siap membunyikan *alarm* bersamaan dengan pemasukkan PMT oleh *closing coil* CC *magnetic alarm* MA yang menggerakkan batang penggerak 1 dihubungkan seri dengan *closing coil* CC Batang penggerak 2 berfungsi membuka Kontak  $K_{10}$  dan digerakkan oleh tombol reset secara manual untuk memberhentikan *alarm* setelah PMT mengalami *trip* ataupun dibuka secara manual. Secara fisik kontak-kontak  $K_4$ ,  $K_5$ ,  $K_6$ ,  $K_7$ , dan  $K_8$  merupakan kontak-kontak bantu PMT yang letaknya pada PMT tersebut. Sedangkan kontak-kontak lain letaknya pada panel yang cukup jauh (bisa mencapai jarak beberapa puluh meter) dari PMT. Oleh karena itu, kabel untuk pengawatan sekunder juga cukup panjang dan berkelok-kelok.

Untuk mencegah terjadinya salah penyambungan, maka kabel pengawatan sekunder diberi nomor dan harus ada gambar pengawatan sekunder yang jelas. Gambar pengawatan sekunder sangat diperlukan untuk melakukan pemasangan dan pengujian relai dan PMT. Kumparan TC dan kumparan CC terletak pada PMT. Sedangkan kumparan MA berada dalam panel.

Dari uraian di atas tampak bahwa keandalan pasokan arus searah sangat menentukan keberhasilan sistem proteksi. Kegagalan sistem proteksi sangat berbahaya karena arus hubung singkat yang terjadi sewaktu gangguan tidak diputus oleh PMT sehingga dapat timbul pemanasan yang berlebihan pada peralatan yang dilalui hubung singkat yang besar ini. Akibatnya alat-alat ini bisa meleleh, bahkan PMT bisa meledak dan menimbulkan kebakaran.



Gambar II.110  
Prinsip kerja kontak reset

Keandalan pasokan arus searah tidak semata-mata tergantung kepada kondisi baterai aki saja, tapi juga kondisi pengawatan sekunder yang dilalui arus searah. Tidak boleh ada kontak yang lepas dan juga tidak

boleh ada hubung singkat. Karena hubung singkat kebanyakan dimulai dengan terjadinya hubung tanah terlebih dulu dan instalasi baterai aki sebaiknya ditanahkan. Dengan pentanahan ini diharapkan agar gangguan hubung tanah pada sirkuit arus searah dapat dideteksi oleh relai gangguan hubung tanah (G) atau oleh sekering lebur.

Dalam praktik, pengawatan sekunder untuk arus searah dilaksanakan dengan menggunakan kabel yang menempel pada dinding panel kontrol atau panel proteksi.

Pada panel yang sama mungkin juga ditempelkan pengawatan sekunder arus bolak-balik 380/220 V, misal untuk keperluan penerangan. Dalam hal demikian perlu pengawasan ekstra, jangan sampai tegangan bolak-balik yang melalui kebocoran isolasi menempel pada dinding panel akhirnya masuk ke sistem tegangan searah yang akhirnya dapat merusak baterai aki.

## S. Cara Pemeliharaan

Pemeliharaan bertujuan mempertahankan efisiensi, keandalan, dan umur ekonomis. Dalam perkembangannya, pemeliharaan dilaksanakan sebagai berikut:

1. Pemeliharaan rutin bila ada gangguan atau kerusakan. Cara ini masih dapat digunakan terhadap alat yang peranannya dalam operasi tidak penting.
2. Pemeliharaan periodik. Pemeliharaan dilakukan berdasarkan jangka waktu tertentu berdasarkan buku petunjuk pabrik atau statistik kerusakan atau statistik gangguan.
3. Pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*).

Cara ini sekarang banyak dikembangkan. Cara ini dilakukan berdasarkan pengamatan beberapa data kemudian dilakukan analisis atas data ini untuk menentukan kapan perlu dilakukan pemeriksaan atau pemeliharaan suatu alat. Data yang digunakan untuk analisis pemeliharaan prediktif adalah:

- a. Tahanan isolasi.
- b. Getaran poros.
- c. Suhu kumparan dan suhu bantalan.
- d. Kandungan kotoran (*impurities*) pada minyak isolasi (minyak transformator, minyak PMT).
- e. Hasil pengamatan dengan sinar inframerah.
- f. Hasil pengamatan dengan sinar ultraviolet yang dapat mendeteksi adanya kotoran dan *partial discharge*.

- g. Khusus untuk pemeliharaan prediktif pada transformator diperlukan tambahan dari hasil pengamatan

Saat ini sedang dikembangkan berbagai "*self diagnostic*" program yang banyak digunakan untuk pemeliharaan prediktif

#### 4. Bagian Instalasi yang Harus dipelihara

Bagian-bagian instalasi yang harus dipelihara agar kontinuitas suplai listrik tenaga, yaitu generator, motor listrik, transformator, pemutus tenaga, baterai aki, titik pentanahan, dan sistem proteksi.

##### a) Generator.

Generator yang tidak mempunyai sistem pendinginan tertutup banyak mendapat debu yang menempel pada isolasi stator maupun rotor. Apalagi bila lingkungannya basah, tahanan isolasinya dapat cepat turun, terutama bila generator tersebut sering berhenti sehingga tidak terjadi pemanasan. Untuk itu, isolasi stator dan rotor perlu diukur dan jika hasilnya terlalu rendah, maka perlu dilakukan pembersihan isolasi. Generator yang pendinginannya dengan udara, atau gas hidrogen tetapi tertutup melalui penukar panas, maka selain isolasi stator dan rotor diukur tahanannya, juga suhu udara atau suhu gas hidrogen perlu diukur dan penukar panasnya perlu dibersihkan.

##### b) Motor listrik.

Persoalannya sama dengan generator yang pendinginannya dengan udara. sirkuit terbuka.

##### c) Transformator.

Selain isolasi kumparan juga kekotoran minyak perlu diperiksa dan juga kandungan air dan kandungan asamnya.

##### d) Pemutus tenaga dan saklar-saklar.

Kualitas media isolasinya perlu diperiksa, bila perlu, media isolasinya ditambah atau diganti. Selain kontaknya perlu diperiksa apakah masih serempak dan apakah ada gerakan kontak rusak.

##### e) Baterai aki.

Tegangan setiap sel perlu diperiksa untuk mengetahui ada tidaknya sel yang rusak, jika perlu dilakukan penggantian. Kualitas elektrolitnya juga perlu dicek, bila perlu dilakukan penambahan atau penggantian.

##### f) Semua kontak sambungan.

Kontak sambungan dari semua bagian instalasi listrik perlu diperiksa termasuk dari peralatan tersebut di atas karena kontak sambungan merupakan kelemahan instalasi listrik. Pemeriksaan dapat dilakukan dengan sinar inframerah.

g) Titik pentanahan.

Semua titik pentanahan dalam instalasi listrik perlu dijaga agar tahanannya tidak melebihi 4 ohm. Hal ini diperlukan demi keselamatan manusia yang ada di sekitar instalasi listrik.

h) Sistem proteksi.

Sistem proteksi, khususnya relai-relai, perlu dicek dan dijaga agar berfungsi secara benar.

i) Sambungan listrik.

Dalam instalasi listrik, sambungan listrik merupakan salah satu titik lemah (sering menjadi sumber gangguan). Sambungan listrik dibagi menjadi 2 kategori, yaitu:

- a. Sambungan antara saluran dengan sebuah alat, misalnya antara kabel dengan motor listrik.
- b. Sambungan antara saluran dengan saluran, misalnya antara kabel dengan kabel, atau antara saluran udara, dengan saluran udara.

Pada sambungan kategori (a) antara saluran dengan suatu alat (misalnya sambungan kabel dengan motor listrik) umumnya dilakukan dengan menggunakan sepatu kabel pada ujung kabel yang kemudian dijepit pada klem motor berupa baut dan mur penjepit. Sambungan ini harus secara periodik dikontrol dan bila perlu dibersihkan serta dikeraskan kembali agar kontak sambungannya tetap baik, jangan sampai kontakannya kendur dan menimbulkan gangguan.

Pada sambungan antara saluran dengan saluran, (misalnya antara kabel dengan kabel) umumnya dilakukan dengan menggunakan pipa penyambung (*jointing sleeve*). Pada sambungan tegangan rendah, pipa penyambung ini kemudian cukup dibalut dengan pita isolasi dan diletakkan dalam kotak sambungan. Tetapi untuk sambungan antara 2 kabel tegangan tinggi, misalnya antara dua ujung kabel 20 kV, penyambungan memerlukan keahlian yang lebih tinggi. Pekerjaan ini harus dilakukan oleh petugas yang dilatih khusus untuk mengerjakan penyambungan kabel tegangan tinggi yang dalam bahasa Inggris disebut *cable jointer*. Pekerjaan penyambungan kabel tegangan tinggi memerlukan ketelitian dan kebersihan dalam pelaksanaannya.

Pada saluran listrik yang terbuka, baik tegangan rendah maupun tegangan tinggi, penyambungan atau pencabangan umumnya dilakukan dengan klem khusus. Klem ini ada yang menggunakan cara pengikatan dengan mur dan baut, ada pula yang menggunakan cara penjepitan dengan tekanan yang dalam bahasa Inggris disebut *compression joint*.

Dalam instalasi listrik banyak digunakan peralatan terutama konduktor yang dibuat dari tembaga maupun dari aluminium, tetapi tembaga lebih berat daripada aluminium, begitu pula harganya umumnya lebih mahal daripada aluminium. Oleh karena itu, tidak dapat dihindarkan terjadinya pertemuan/ penyambungan konduktor atau terminal alat yang terbuat dari tembaga dengan konduktor yang terbuat dari aluminium. Titik temu atau titik sambung antara tembaga dengan aluminium harus diperhatikan secara khusus karena bila disambung tanpa alat khusus, sambungan ini akan mengalami korosi dan akhirnya menimbulkan gangguan. Penyambungan ini harus dilakukan dengan menggunakan klem khusus yang disebut klem bimetal. Di jaringan tegangan rendah, penyambungan konduktor tembaga dengan konduktor aluminium sering dilakukan dengan menggunakan klem aluminium yang ditutup dengan tutup gemuk (*grease*) pencegah korosi, kemudian ditutup dengan tutup plastik untuk mencegah gemuk tersebut hilang akibat siraman air hujan.

## T. Perkembangan Isolasi Kabel

### 1. Kabel Tegangan Rendah.

Dalam pusat listrik terdapat kabel tegangan rendah untuk menyalurkan daya dan kabel tegangan rendah untuk keperluan pengawatan sekunder dan untuk keperluan kontrol.

Kabel tegangan rendah untuk penyaluran daya ada yang mempunyai luas penampang konduktor  $2,5 \text{ mm}^2$  (terbuat dari tembaga) sampai luas penampang  $150 \text{ mm}^2$  (terbuat dari tembaga ataupun aluminium) di mana yang mempunyai penampang  $2,5 \text{ mm}^2$  digunakan untuk keperluan lampu penerangan sedangkan yang mempunyai luas penampang di atas  $10 \text{ mm}^2$  (terbuat dari tembaga) digunakan untuk motor-motor listrik. Kabel aluminium dengan penampang sampai  $150 \text{ mm}^2$  umumnya digunakan sebagai kabel sisi tegangan rendah transformator pemakaian sendiri.

Semua kabel penyalur daya, terutama, yang melalui tempat terbuka, harus diperhitungkan terhadap tekanan mekanis dan bila perlu diletakkan dalam saluran kabel (*cable duct*) atau dalam pipa. Hal ini perlu untuk memperkecil risiko kebakaran karena, hubung singkat.

Kabel tegangan rendah untuk pengawatan sekunder dan kontrol umumnya dipasang dalam panel yang terlindung dan dalam saluran kabel, tidak melalui tempat terbuka. Berdasarkan pertimbangan tersebut di atas, maka isolasi kabel daya berbeda dengan isolasi kabel pengawatan sekunder maupun kabel kontrol.

Dalam perkembangannya, isolasi kabel tegangan rendah dimulai dengan isolasi yang terbuat dari karet. Sekarang banyak digunakan karet buatan atau campuran karet alam dengan bahan kimia tertentu yang disebut isolasi tipe protodur. Untuk kabel daya harus ada lapisan penguat, terutama jika dipasang di dalam rumah, lapisan penguat ini biasanya lapisan PVC (*Poly Vynil Chlorida*) dan pelat baja.

## 2. Kabel tegangan tinggi.

Kabel tegangan tinggi (di atas 1 kV) yang umumnya dipasang dalam tanah, pada mulanya menggunakan isolasi kertas yang diresapi minyak (*oil impregnated*). Untuk tegangan di atas 70 kV, digunakan minyak bertekanan sebagai isolasi.

Dalam perkembangannya, banyak digunakan isolasi *cross link polyethylene* yang dalam praktik sering disebut sebagai isolasi XLPE. Kabel dengan isolasi XLPE sekarang telah bisa mencapai tegangan operasi 400 W. Hal-hal yang perlu diperhatikan pada pemakaian kabel berisolasi XLPE adalah isolasi XLPE tidak tahan air dan sinar matahari. Oleh karena, itu, kabel berisolasi XLPE perlu dilapisi isolasi PVC yang kedap air sebagai pelindung luarnya. Di samping itu, isolasi XLPE tidak tahan tegangan searah sebesar nilai nominal tegangan bolak-baliknya.

Dengan penggunaan kabel berisolasi XLPE, proses penyambungan kabel menjadi lebih mudah dibandingkan proses penyambungan kabel berisolasi kertas dengan resapan minyak maupun dengan kabel berisolasi minyak bertekanan.

Ada 4 macam teknik penyambungan kabel berisolasi XLPE, yaitu:

- Teknik *Moulding*.  
Kabel yang akan disambung secara mekanik dihubungkan terlebih dahulu dalam kotak sambung. Kemudian dua cairan calon isolasi dimasukkan ke dalam kotak sambung. Dua cairan setelah bercampur dalam kotak sambung akan mengeras menjadi isolasi.
- Teknik *Premolded*.  
Isolasi yang akan dipasang dalam kotak sambung telah dicetak terlebih dahulu. Kemudian penyambungan konduktor kabel dilakukan dalam kotak sambung dengan menuruti alur yang telah dibuat oleh isolasi tersebut di atas.

- Teknik panas sempit (*heat shrink*).  
Isolasi berupa bahan tipis dan fleksibel diselongsongkan pada konduktor kabel yang akan disambung. Selongsong isolasi ini kemudian dipanasi dan setelah selesai pemanasan akan menyempit lalu mencuram konduktor kabel bersangkutan. Kemudian sambungan konduktor kabel diletakkan dalam kotak sambungan yang kedap air dan kotak sambung ini berfungsi juga sebagai pelindung mekanis.
- Teknik *Slip-on*.  
Konduktor kabel yang akan disambung dimasukkan ke dalam bahan isolasi yang berlubang sesuai dengan ukuran konduktor kabel, melalui proses *slip-on* dimasukkan secara "paksa" sehingga terjadi sambungan yang kedap air. Kotak sambung berfungsi melindungi air, merendam sambungan, dan melindungi sambungan ini terhadap tekanan mekanis. Keempat teknik tersebut di atas dapat diterapkan pada pemasangan kotak ujung kabel, yang berfungsi sebagai terminasi kabel. Kotak sambung maupun kotak ujung (terminasi) kabel berisolasi XLPE harus kedap air dan juga harus melindungi isolasi XLPE tersebut dari sinar matahari. Air dan sinar matahari dapat menimbulkan karbonisasi pada isolasi XLPE ini yang dalam bahasa Inggris disebut *treeing effect*, yaitu timbulnya jalur-jalur berwarna hitam (karbon) dalam bahan isolasi XLPE.

Kabel untuk pengawatan sekunder maupun untuk keperluan kontrol umumnya menggunakan isolasi protodur atau PVC, dan kabel ini sebaiknya diberi macam-macam warna untuk memudahkan identifikasinya yang berkaitan dengan fungsi kabel tersebut; misalnya kabel untuk tegangan digunakan kabel yang berwarna hijau, dan kabel untuk arus digunakan yang berwarna merah.

Jika suhu ruangan tempat kabel akan dipasang, baik kabel untuk daya maupun kabel pengawatan sekunder dan kontrol, relatif tinggi (misalnya di atas 50<sup>o</sup> C), maka perlu diperhatikan spesifikasi kabel yang akan dipasang berkaitan dengan suhu tersebut. Bila perlu, gunakanlah kabel khusus yang tahan api.

Gambar Il.111 menunjukkan berbagai macam kabel, baik untuk penyalur daya maupun untuk pengawatan sekunder dan kontrol.



Gambar II.111

Berbagai macam kabel, baik untuk penyalur daya maupun untuk pengawatan sekunder dan kontrol

Berbeda dengan kabel yang digunakan pada jaringan distribusi, kabel penyalur daya pada pusat listrik umumnya kabel satu fasa dan isolasinya dilindungi dengan lapisan PVC saja dan tidak perlu dilindungi pelat baja (*steel armouring*). Hal ini dapat dilakukan karena di pusat listrik kabel diletakkan dalam saluran kabel yang secara mekanis telah melindungi kabel bersangkutan terhadap benturan mekanis. Pemilihan kabel satu fasa adalah dari pertimbangan fleksibilitas pemasangan, karena jalannya kabel dalam pusat listrik dan dari generator ke rel banyak melalui tikungan bahkan pada tempat-tempat tertentu perlu dimasukkan ke dalam pipa sebagai pelindung mekanisnya di bagian luar saluran kabel.

Pada jaringan distribusi yang ditanam dalam tanah, kabel yang tidak banyak melalui tikungan tajam, sehingga ditanam langsung dalam tanah, tanpa saluran dan karenanya kabel yang cocok dipakai adalah kabel tiga fasa tetapi dengan pelindung mekanis berupa pelat baja selain lapisan PVC yang kedap air.

Keadaan ini dapat mengganggu seluruh sistem, terutama jika menyangkut generator yang besar dayanya bagi sistem. Selain itu, keadaan asinkron akan menimbulkan pemanasan yang berlebihan pada

rotor generator sinkron sebagai akibat timbulnya arus pusar yang berlebihan yang merupakan hasil induksi medan putar stator yang tidak sinkron terhadap rotor.

Karena keadaan asinkron tidak dikehendaki, maka lanjutan dari busur lingkaran BC "dipatahkan" menjadi lengkung CD.

Besar tekanan gas hidrogen, makin besar efek pendinginannya sehingga dapat digunakan arus penguat yang lebih besar. Hal ini ditunjukkan oleh lengkung yang memungkinkan pembangkitan daya reaktif yang lebih besar.

## U. Generator Asinkron

Pada PLTA dengan daya relatif kecil (kurang dari 1% terhadap daya yang dibangkitkan sistem) seringkali digunakan generator asinkron, yaitu motor asinkron yang dimasukkan ke dalam sistem kemudian diputar oleh air sehingga motor asinkron ini berputar lebih cepat daripada putaran sinkronnya (mempunyai nilai slip). Pengoperasian ini tidak memerlukan proses sinkronisasi sehingga memudahkan otomatisasi, dapat dari jauh, dan tidak memerlukan operator (tidak dijaga). Jika ada gangguan, relai pengaman akan men-*trip* PMT generator dan memberhentikan turbin airnya. Apa yang terjadi dapat dilihat dari jauh (*remote*). Setelah dicek dan aman, PLTA dapat dioperasikan kembali dari jauh maupun dekat (setempat).

### Generator dijadikan motor *Start* pada Turbin Gas

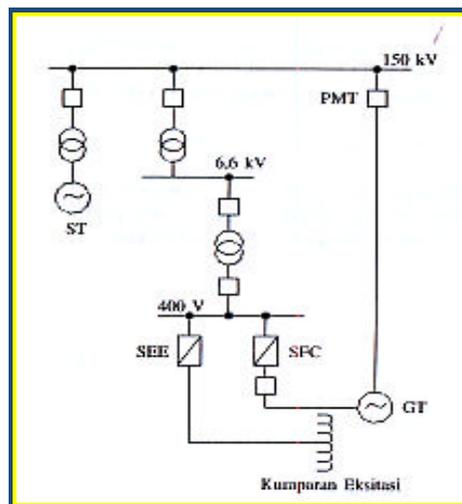
Untuk men-*start* turbin gas diperlukan daya mekanis untuk memutar poros turbin dan juga poros dari generator agar didapatkan udara bertekanan yang akan dicampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar yang selanjutnya akan dinyalakan agar menghasilkan gas hasil pembakaran penggerak turbin sehingga akhirnya mekanis yang diperlukan untuk men-*start* turbin tersebut di atas bisa berasal dari mesin diesel yang akan menggunakan baterai aki atau dari motor listrik yang disediakan kbusus untuk *start* juga pabrik yang mendesain turbin gas yang menggunakan generator utamanya sebagai motor *start*.

Contoh adalah PLTGU buatan Siemens yang diagram satu garisnya adalah seperti ditunjukkan oleh generator utama memberikan dayanya kepada rel 150 W. Rel 6,6 kV adalah rel untuk alat-alat bantu penggerak pompa air pendingin dan motor pengisi air ketel. Rel 400 Volt adalah rel untuk sebagai alat bantu seperti: excitacy statis yang diperlukan sewaktu *start*, adalah frekuensi statis yang diperlukan untuk men-*start* generator sebagai motor *start*, men-*start* turbin gas dengan cara menjadikan

generator sebagai motor *start*, generator tersebut dengan kumparan asinkron kemudian di-*start* sebagai motor asinkron. Pada proses *start* ini, diberi pasokan 400 volt dengan frekuensi rendah yang diatur oleh SFC. Setelah generator ini dari motor asinkron, frekuensinya secara bertahap dinaikkan sehingga putaran generator terus mendekati putaran sinkron kemudian diberi penguatan oleh SEE sehingga generator ini untuk paralel dengan sistem. Setelah generator ini paralel dengan sistem, langkah selanjutnya adalah menghidupkan paralel tersebut di atas, harus dijaga agar tegangan 150 kV tidak bertabrakan dengan yang dapat dilakukan dengan membuka PMT No. 1 terlebih dahulu sebelum PMT No. 2

### 1. Rekaman Kerja PMT

Pada hasil rekaman didapat butir-butir data dan gambar-gambar rekaman dan tanggal serta jam (pukul) rekaman dilakukan. Seperti yang terlihat pada Gambar II.114, perekaman didapatkan pada, tanggal 19 Juli 2002 pukul 19.46.



Gambar II.112

Diagram satu garis dari PLTGU di mana turbin gas di-*start* oleh generatornya yang dijadikan motor *start*

Keterangan:

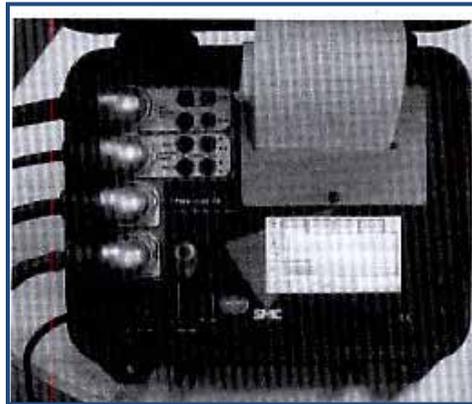
PMT=Pemutus Tenaga (CBI *Circuit Breaker*); SEE = Peralatan *Excitacy Statis*;

FC=Pengubah Frekuensi Statis; ST = Generator Turbin Uap; GT=Generator Turbin Gas

Data dan gambar yang didapat adalah:

### 1. Test Identification Data

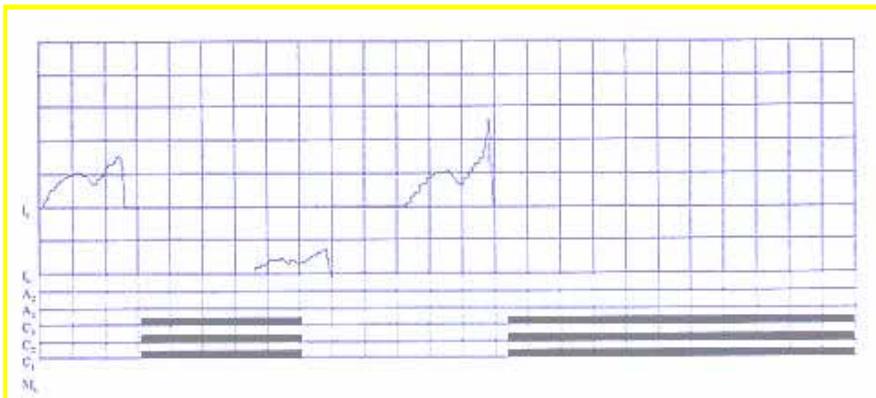
Data yang menyangkut pembuat rekaman kerja PMT dan operator tidak ditampilkan di sini, dengan harapan tidak melanggar etika bisnis.



Gambar II.113

Foto dari sebuah alat perekam kerja (untuk pengujian) PMT buatan Euro SMC

### 2. Test Configuration Data



Gambar II.114

Data Hasil Pengujian Pemutus Tenaga

Keterangan:

Operation: C-O-C atau Close-Open -Close. Ini artinya bahwa percobaan dilakukan dengan mode tutup (close), buka. (open), dan tutup (close). Durasi Waktu: 80-80-100-100 (milidetik).

*Trigger* (Pemicu): *Operation*, artinya hal ini dilakukan oleh alat perekam ini dengan diprogram terlebih dahulu.

*Record Length*: 800 *miliseconds*. Artinya alat perekam ini bisa melakukan perekaman selama 800 milidetik.

*Rebound Time*: 2 *miliseconds*. *Rebound Time* adalah waktu antara berhentinya (menjadi nolnya) arus dalam *closing coil* (dalam Gambar II.114 ditunjukkan dengan Ic yang menjadi nol) saat menutupnya kontak utama PMT, yaitu C3. Dalam kontak utama yang pertama masuk adalah C3, ditunjukkan oleh garis tebal. Ic adalah arus dari *closing coil* dan 10 adalah arus dari *trip coil*, dan *auxiliary contacts*; misalnya kontak K5 dan kontak K6 untuk menyalakan lampu sinyal merah dan lampu sinyal hijau).

### 3. *Timing*

Semua pengukuran waktu dinyatakan dalam milidetik. Ada tabel waktu dari hasil rekaman yang disusun untuk kerjanya ketiga buah kontak utama (dalam milidetik):

4. Arus Kumparan (arus searah)
5. Tahanan Kontak
6. Grafik-grafik

Alat perekam kerja PMT ini harus dihubungkan ke *closing coil*, *trip coil*, serta kontak-kontak bantu PMT dengan memperhatikan pengawatan sekunder PMT.

Hasil rekaman kerja PMT ini harus dianalisis dengan mengacu pada buku petunjuk pemeliharaan PMT bersangkutan. Hal-hal yang perlu diperhatikan adalah:

- a. Waktu pembukaan PMT harus secepat mungkin, yaitu sekitar 3 *cycle* atau 60 milidetik, untuk sistem dengan frekuensi 50 Hz. Dari grafik Gambar II.114, tampak waktu pembukaan PMT adalah kira-kira 50 milidetik, yaitu sejak timbul 10 (*arus trip coil*) sampai PMT membuka (garis tebal terputus).
- b. Keserempakan pembukaan ketiga kontak utama; apabila tidak serempak besar kemungkinan ada bagian kontak yang pembukaannya terlambat akibat telah mengalami keausan yang berlebihan

### Pentanahan

Dalam sebuah instalasi listrik ada empat bagian yang harus ditanahkan atau sering juga disebut dibumikan. Empat bagian dari instalasi listrik ini adalah:

- a. Semua bagian instalasi yang terbuat dari logam (menghantar listrik) dan dengan mudah bisa disentuh manusia. Hal ini perlu agar potensial dari logam yang mudah disentuh manusia selalu sama dengan potensial tanah (bumi) tempat manusia berpijak sehingga tidak berbahaya bagi manusia yang menyentuhnya.
- b. Bagian pembuangan muatan listrik (bagian bawah) dari *lightning arrester*. Hal ini diperlukan agar *lightning arrester* dapat berfungsi dengan baik, yaitu membuang muatan listrik yang diterimanya dari petir ke tanah (bumi) dengan lancar.

Kawat petir yang ada pada bagian atas saluran transmisi. Kawat petir ini sesungguhnya juga berfungsi sebagai *lightning arrester*. Karena letaknya yang ada di sepanjang saluran transmisi, maka semua kaki tiang transmisi harus ditanahkan agar petir yang menyambar kawat petir dapat disalurkan ke tanah dengan lancar melalui kaki tiang saluran transmisi.

Titik netral dari transformator atau titik netral dari generator. Hal ini diperlukan dalam kaitan dengan keperluan proteksi khususnya yang menyangkut gangguan hubung tanah.

Dalam praktik, diinginkan agar tahanan pentanahan dari titik-titik pentanahan tersebut di atas tidak melebihi 4 ohm.

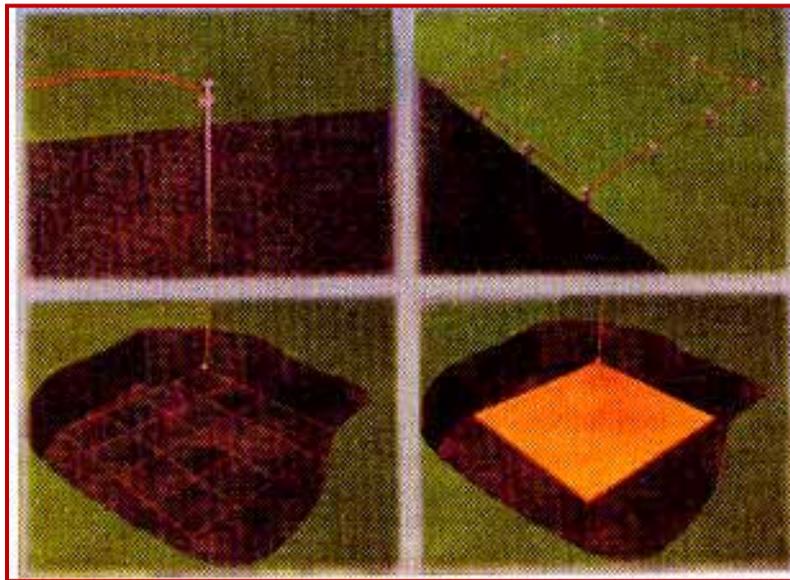
Secara teoretis, tahanan dari tanah atau bumi adalah nol karena luas penampang bumi tak terhingga. Tetapi kenyataannya tidak demikian, artinya tahanan pentanahan nilainya tidak nol. Hal ini terutama disebabkan oleh adanya tahanan kontak antara alat pentanahan dengan tanah di mana alat tersebut dipasang (dalam tanah). Alat untuk melakukan pentanahan ditunjukkan oleh Gambar II.115.

Batang pentanahan tunggal (*single grounding rod*). Batang pentanahan ganda (*multiple grounding rod*). Terdiri dari beberapa batang tunggal yang dihubungkan paralel. Anyaman pentanahan (*grounding mesh*), merupakan anyaman kawat tembaga. Pelat pentanahan (*grounding plate*), yaitu pelat tembaga.

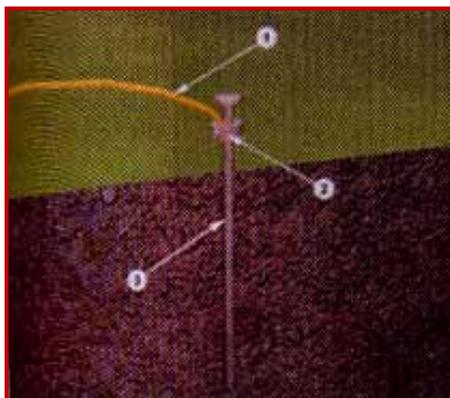
Tahanan pentanahan selain ditimbulkan oleh tahanan kontak tersebut di atas juga ditimbulkan oleh tahanan sambungan antara alat pentanahan dengan kawat penghubungnya. Unsur lain yang menjadi bagian dari tahanan pentanahan adalah tahanan dari tanah yang ada di sekitar alat pentanahan yang menghambat aliran muatan listrik (arus listrik) yang keluar dari alat pentanahan tersebut. Arus listrik yang keluar dari alat pentanahan ini menghadapi bagian-bagian tanah yang berbeda tahanan jenisnya. Untuk jenis tanah yang sama, tahanan jenisnya dipengaruhi

oleh kedalamannya. Makin dalam letaknya, umumnya makin kecil tahanan jenisnya, karena komposisinya makin padat dan umumnya juga lebih basah.

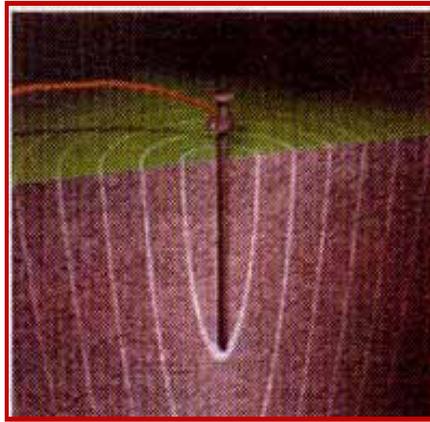
Oleh karena itu, dalam memasang batang pentanahan, makin dalam pemasangannya akan makin baik hasilnya dalam arti akan didapat tahanan pentanahan yang makin rendah.



Gambar II.115  
Empat Alat Pentanahan



Gambar II.116  
Batang Pentanahan Beserta Aksesoriya



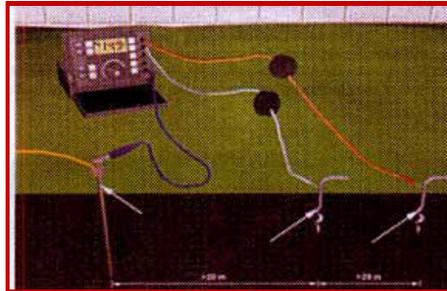
Gambar II.117  
Batang Pentanahan dan Lingkaran Pengaruhnya

Tabel II.2  
Tahanan jenis berbagai macam tanah serta tahanan pentanahan

Macam Tanah	Tahanan Jenis (ohm-m)	Tahanan Pentanahan ( $\Omega$ )					
		Kedalaman Batang Pentanahan (m)			Panjang Pita Pentanahan (m)		
		3	6	10	5	10	20
1. Humus lembab	30	10	5	3	12	6	3
2. Tanah pertanian, tanah liat	100	33	17	10	40	20	10
3. Tanah liat berpasir	150	50	25	15	60	30	15
4. Pasir lembab	300	66	33	20	80	40	20
5. Pasir kering	1.000	330	165	100	400	200	100
6. Beton 1:5	400	-	-	-	160	80	40
7. Kerikil lembab	500	160	80	48	200	100	50
8. Kerikil kering	1.000	330	165	100	400	200	100
9. Tanah berbatu	30.000	1.000	500	300	1.200	600	300
10. Batu karang	$10^7$	-	-	-	-	-	-

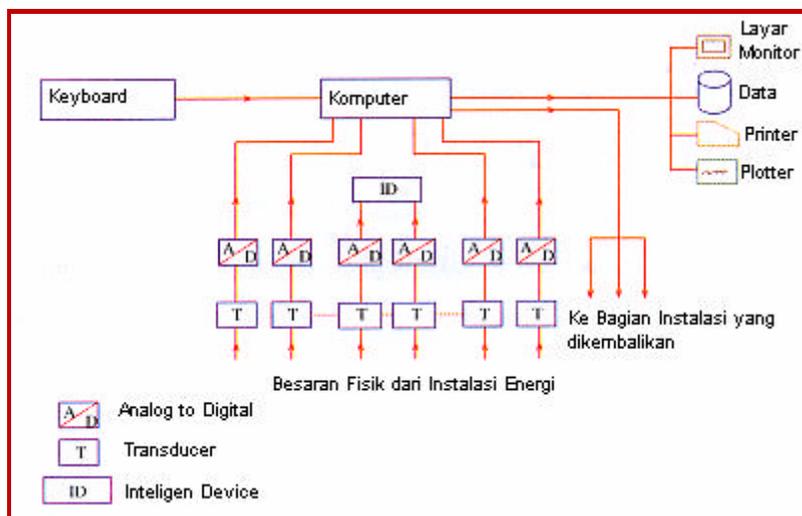
Tampak bahwa makin dalam letaknya di dalam tanah sampai kedalaman yang sama dengan kedalaman batang pentanahan, dan lingkaran pengaruh ini makin dekat dengan batang pentanahan. Hal ini disebabkan oleh adanya variasi jenis tanah seperti tersebut di atas. Tabel II.2 menunjukkan tahanan jenis berbagai macam tanah serta tahanan pentanahan dengan berbagai aman dan apabila digunakan pita pentanahan (*grounding strip*) dengan berbagai ukuran panjang: Untuk memperoleh tahanan pentanahan di humus lembab batang pentanahannya dipancang sedalam 5 m tetapi bila di pasir kering kedalamannya harus 165 m. Cara mengukur tahanan tanah secara umum adalah seperti yang ditunjukkan oleh Gambar II.118. Pada ini tampak batang pentanahan yang akan diukur tahanan pentanahannya

ditanam paling kiri. Paling kanan adalah batang pembantu untuk menyuntikkan arus dari alat pengukur tahanan pentanahan. Arus kemudian mengalir kembali ke alat pengukur melalui batang pentanahan dan kabel warna biru (paling kiri).

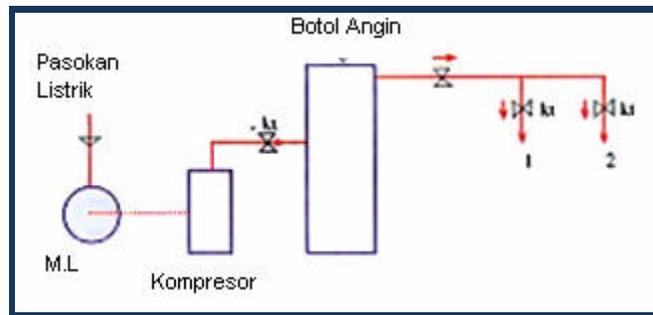


Gambar II.118  
Cara mengukur tahanan pentanahan

Pengukuran dilakukan pada konduktor yang menghubungkan batang pentanahan dengan alat yang ditanahkan oleh batang harus dilepas. Alat pengukur ini mengukur tegangan antara batang pembantu yang ada di tengah dan batang pentanahan. Selanjutnya alat pengukur ini akan menghitung tahanan pentanahan menurut hukum Ohm. Pembukaan dan penutupan saklar rangkaian listrik bisa dilakukan dengan pulsa digital karena hanya memerlukan dua macam posisi, yaitu membuka atau menutup. Tetapi pembukaan dan penutupan sudu jalan dari air yang dilakukan melalui pengaturan sekunder *governor* memerlukan gerakan analog sehingga didapat pengaturan yang halus.



Gambar II.119  
Penggunaan Transformator Arus Klem



Gambar II.120

Bagan Instalasi Pneumatik (Udara Tekan) dari Sebuah PLTD

Keterangan:

M.L = Motor Listrik; Katub Satu Arah; 1 Ke Mesin Diesel untuk *Start*, 2 Ke *Emergency Stop unit* yang ada.

Kontrol otomatis secara penuh (*full automatic control*) telah banyak dilakukan pada PLTA dan PLTG. PLTA dioperasikan secara otomatis dari jarak jauh (*remote*) dengan menekan tombol *start-stop* saja bahkan dengan tombol untuk mengatur daya yang dibangkitkan.

Dari segi perangkat lunak (*software*) umumnya instalasi kontrol dari pusat listrik dilengkapi dengan program sebagai berikut:

a. *Data Acquisition*

Program ini menyelenggarakan pengumpulan dan penyajian data dan informasi yang diinginkan.

b. *Threshold Values*

Program ini mengatur pemberian peringatan (*warning*) apabila ada besaran yang melampaui nilai batas yang diperbolehkan.

c. *Fault Recording*

Program ini mencatat kejadian-kejadian yang tidak normal (gangguan) dan memberikan analisisnya.

Program ini mencatat besaran-besaran tertentu yang berkaitan dengan pemeliharaan, misalnya getaran dan suhu bantalan kemudian menganalisis data ini dan selanjutnya memberikan rekomendasi mengenai langkah pemeliharaan yang harus dilakukan.

e. *Program Interupsi*

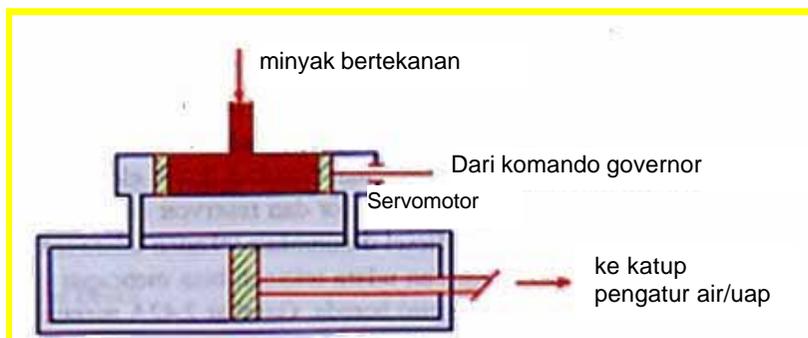
Program interupsi memberikan prioritas untuk melakukan interupsi terhadap proses pengambilan data karena ada hal yang *urgent* yang perlu segera diberitahukan operator, misalnya kalau ada gangguan.

f. *Program Automatic Control*

Yaitu program untuk mengatur secara otomatis besaran-besaran tertentu misalnya mengatur tekanan dan suhu uap pada PLTU.

Program untuk *start* dan *stop* secara otomatis serta pengaturan dayanya. Instalasi kontrol juga berinteraksi dengan instalasi proteksi. Misalnya jika PMT generator pada PLTU *trip* relai diferensial yang bekerja, instalasi kontrol bersangkutan diberi tahu oleh instalasi proteksi kejadian ini, kemudian instalasi kontrol ini melakukan langkah-langkah pengaturan yang diperlukan, program *automatic control* yang ada padanya (udara tekan) dari sebuah PLTD. Katup satu arah bisa dibuka oleh elektromagnet yang mendapat arus searah dari baterai. Jika suatu terdiri atas beberapa unit maka banyaknya katup *start* dan katup *emergency stop* adalah sama dengan jumlah magnet yang membuka katup *emergency stop* diperintah oleh relai-relai yang dikehendaki oleh sistem proteksi misalnya oleh relai diferensial, relai tekanan minyak pelumas rendah dan relai suhu air pendingin tinggi. Sedangkan katup *start* dibuka oleh elektromagnet yang ada kaitannya dengan tombol *start* atau *handel start* dari mesin diesel. Dalam praktik setiap botol angin atau *reservoir* udara tekan harus dilengkapi katup pengaman dan katup pembuang kandungan uap air udara yang mengembun di dalam botol angin atau *reservoir* udara tekan tersebut.

Pada PLTA dan PLTU yang kapasitasnya umumnya lebih besar dari pada PLTD diperlukan pengaturan daya yang dibangkitkan melalui pengaturan katup air dari turbin air atau pengaturan katup (*throttle*) uap dari turbin uap yang membutuhkan gaya yang besar. Pengaturan ini dikomando oleh *governor*, tetapi *governor* adalah relatif kecil, maka gaya komando (perintah) yang keluar dari *governor* ini perlu diperkuat melalui suatu *amplifier* mekanis untuk bisa mengatur katup air atau katup uap seperti tersebut di atas.



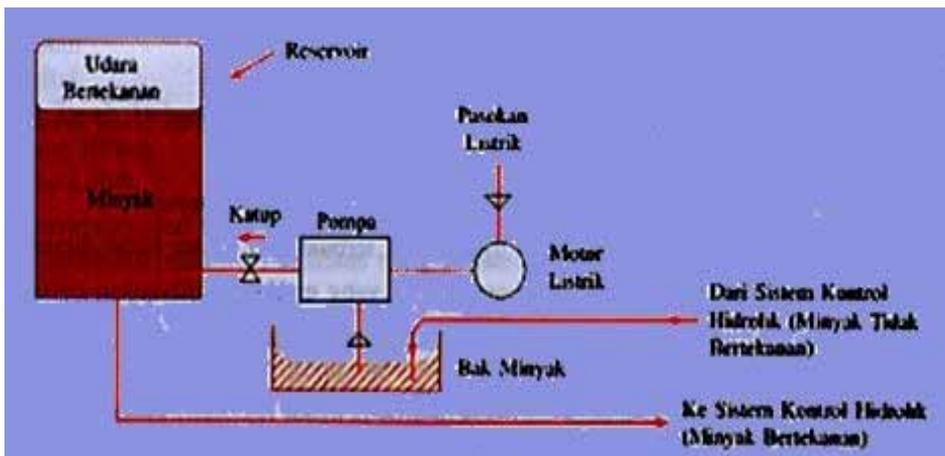
Gambar II.121  
Amplifier hidrolik

*Amplifier* mekanis ini dilakukan melalui sistem hidrolik. *Amplifier* mekanis ini analog dengan tabung trioda atau transistor. Gaya komando (arus basis) memodulasi minyak bertekanan (tegangan pasokan V) menjadi tekanan tinggi (tegangan emiter) untuk menghasilkan daya yang besar untuk menggerakkan katup (beban).

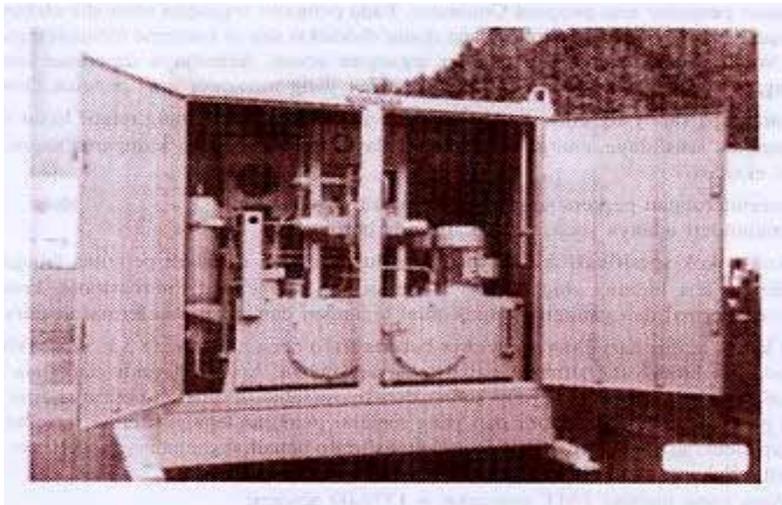
Pada sistem kontrol hidrolik perlu diingat bahwa minyak (cairan) adalah tidak kompresibel, artinya tidak bisa mampat atau mengembang seperti halnya udara pada sistem pneumatik.

Dalam praktik servomotor dilengkapi dengan *dashpot* yang berfungsi sebagai peredam untuk mencegah terjadinya osilasi. Untuk membatasi jumlah minyak yang diperlukan dalam sistem kontrol hidrolik, *reservoir* minyak beserta bak minyak diusahakan letaknya berdekatan dengan turbin yang akan diatur katupnya. Pengaturan katup turbin seperti uraian di atas, yang memerlukan gaya mekanik besar dan kontinu, cocok dilakukan memakai sistem pengaturan hidrolik.

Katup-katup yang jarang dibuka atau ditutup dan tidak memerlukan pengaturan, dapat dibuka atau ditutup dengan memakai motor listrik yang dikomando dari ruang kontrol (*control room*), generator, sistem excitacy, susunan rel, saklar-saklar, pengatur regangan otomatis, *governor*, sistem proteksi dan pentanahan bagian-bagian Instalasi.



Gambar II.122  
Reservoir minyak bertekanan untuk sistem kontrol



Gambar II.123  
Komponen peralatan untuk pengaturan hidrolis

#### V. Latihan

1. Bagaimanakah pengaruh besarnya arus *excitacy* terhadap besar tegangan *output* generator sinkron 3 fasa dengan jumlah putaran tetap, baik untuk penguatan tersendiri maupun sendiri
2. Lakukan praktik di laboratorium dengan bimbingan guru dan teknisi untuk butir soal nomor 1
3. Lakukan pengamatan terhadap sistem proteksi pada unit pembangkit yang ada di sekolah anda, apakah masih bekerja sistem pengamannya. Jika tidak, catat jenis proteksi dan spesifikasinya yang perlu ditambah
4. Lakukan praktik transformator beban nol dan berbeban di laboratorium dengan bimbingan guru dan teknisi

#### W. Tugas

Dari hasil kegiatan anda di laboratorium, buat laporan dan diskusikan bersama teman di kelas dengan bimbingan guru



## BAB III

# MASALAH OPERASI PADA PUSAT-PUSAT LISTRIK

Tujuan bab ini adalah menguraikan masalah-masalah proses konversi energi dan operasi yang ada pada PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP, PLTD, PLTN, dan unit-unit pembangkit khusus. Masalah pelestarian hutan dalam kaitannya dengan operasi PLTA dan PLTP. Masalah pengadaan dan penyimpanan bahan bakar untuk pusat-pusat listrik *thermis*. Macam-macam bahan bakar serta spesifikasinya seperti nilai kalori dan kandungan unsur yang tidak dikehendaki.

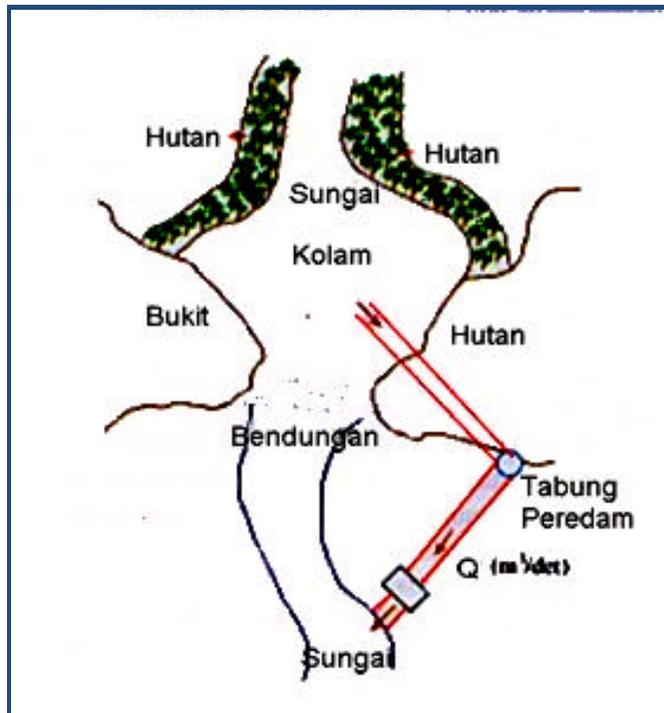
### A. Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA)

Dalam PLTA, potensi tenaga air dikonversikan menjadi tenaga listrik. Mula-mula potensi tenaga air dikonversikan menjadi tenaga mekanik dalam turbin air. Kemudian turbin air memutar generator yang membangkitkan tenaga listrik.

Gambar III.1 menggambarkan secara skematis bagaimana potensi tenaga air, yaitu sejumlah air yang terletak pada ketinggian tertentu diubah menjadi tenaga mekanik dalam turbin air.



Gambar III.1  
Proses Konversi Energi dalam Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA)



Gambar III.2  
Instalasi Tenaga Air PLTA Bila Dilihat dari Atas

Daya yang dibangkitkan generator yang diputar oleh turbin air adalah:

$$P = k \cdot ? \cdot H \cdot q \quad [\text{kW}] \quad (3-1)$$

Keterangan:

P = daya [kW]

H = tinggi terjun air [meter]

q = debit air [ $\text{m}^3/\text{detik}$ ]

? = efisiensi turbin bersama generator

k = konstanta.

### 1. Bangunan Sipil

Potensi tenaga air didapat pada sungai yang mengalir di daerah pegunungan. Untuk dapat memanfaatkan potensi tenaga air dari sungai ini, maka kita perlu membendung sungai tersebut dan airnya disalurkan ke bangunan air PLTA seperti ditunjukkan oleh Gambar III.3. Ditinjau dari caranya membendung air, PLTA dapat dibagi menjadi dua kategori:

- a. PLTA *run off river*
- b. PLTA dengan kolam tando (*reservoir*)

PLTA *run off river*, air sungai dialihkan dengan menggunakan dam yang dibangun memotong aliran sungai. Air sungai ini kemudian disalurkan ke bangunan air PLTA seperti pada Gambar III.4

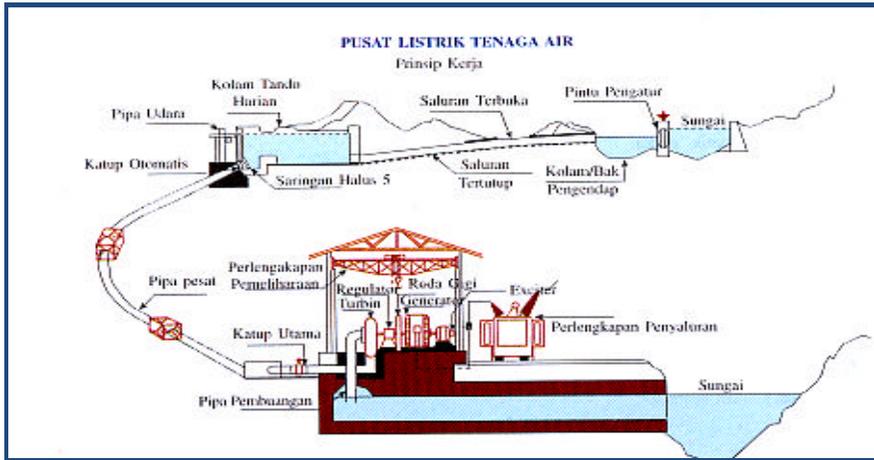
PLTA dengan kolam tando (*reservoir*), aliran sungai dibendung dengan bendungan besar agar terjadi penimbunan air sehingga terjadi kolam tando. Selanjutnya air dari kolam tando dialirkan ke bangunan air PLTA seperti Gambar III.4. Dengan adanya penimbunan air terlebih dahulu dalam kolam tando, maka pada musin hujan di mana debit air sungai besarnya melebihi kapasitas penyaluran air bangunan air PLTA, air dapat ditampung dalam kolam tando. Pada musim kemarau di mana debit air sungai lebih kecil dari pada kapasitas penyaluran air bangunan air PLTA, selisih kekurangan air ini dapat di atasi dengan mengambil air dari timbunan air yang ada dalam kolam tando. Inilah keuntungan penggunaan kolam tando pada PLTA. Hal ini tidak dapat dilakukan pada PLTA *run off river*.

PLTA *run off river*, daya yang dapat dibangkitkan tergantung pada debit air sungai. Tetapi PLTA *run off river* biaya pembangunannya lebih murah dari pada PLTA dengan kolam tando (*reservoir*), karena kolam tando memerlukan bendungan yang besar dan juga memerlukan daerah genangan yang luas.

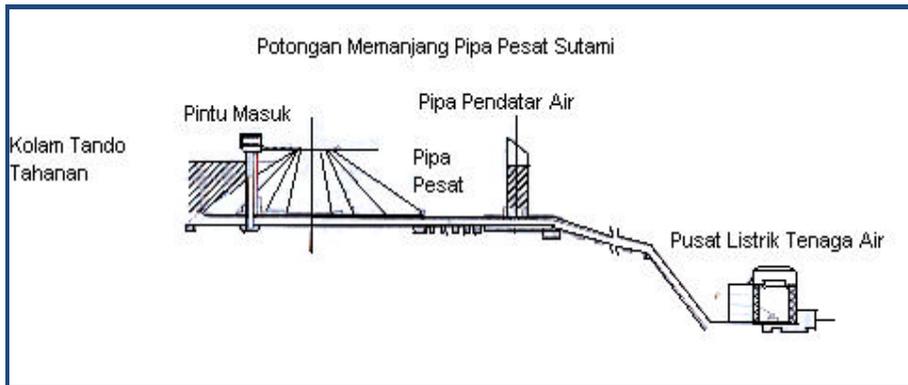
Jika ada sungai yang mengalir keluar dari sebuah danau, maka dapat dibangun PLTA dengan menggunakan danau tersebut sebagai kolam tando. Contoh mengenai hal ini, yaitu PLTA Asahan yang menggunakan Danau Toba sebagai kolam tando, karena Sungai Asahan mengalir dari Danau Toba.

Bangunan air PLTA yang mengalirkan air dari dam pada PLTA *run off river* dan dari kolam tando pada PLTA yang menggunakan bendungan sampai ke turbin digambarkan oleh Gambar III.4. Secara garis besar, bangunan air ini terdiri dari saluran air yang terbuka atau tertutup (terowongan) sampai pada tabung peredam.

## PUSAT LISTRIK TENAGA AIR



Gambar III.3  
Prinsip Kerja PLTA Run Off River



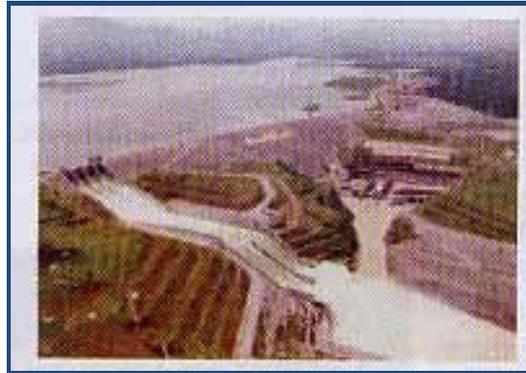
Gambar III.4  
Potongan memanjang pipa pesat PLTA Sutami  
(PLTA dengan kolam tando *reservoir*)

Sebelum tabung peredam terdapat katup pengaman dan setelah tabung peredam terdapat saluran air berupa pipa pesat yang harus tahan guncangan tekanan air. Tabung peredam dalam bahasa Inggris disebut *surge tank* dan berfungsi meredam guncangan tekanan air yang terjadi dalam pipa pesat.

Pada ujung bawah pipa pesat terdapat katup utama turbin. Dari katup utama turbin, air menuju ke katup pengatur turbin, lalu air mengenai roda

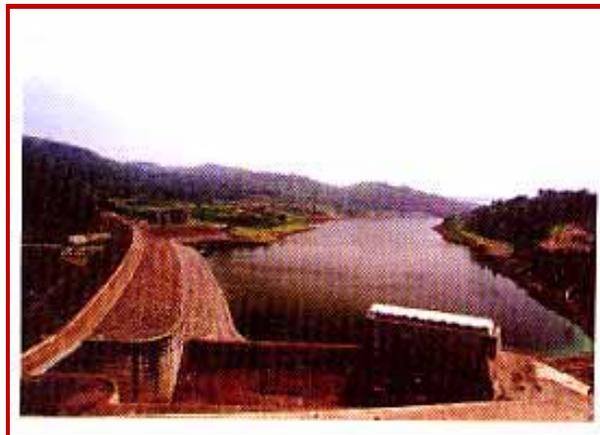
air turbin yang mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik roda air turbin.

Gambar-gambar III.5 sampai dengan Gambar III.10 adalah foto-foto dari berbagai bangunan PLTA.



Gambar III.5

Bendungan IETA Mrica di Jawa Tengah dengan kapasitas 3 x 60,3 MW di mana tampak bendungan beserta pelimpasannya (sisi kiri) dan gedung PLTA beserta air keluarnya (sisi kanan)



Gambar III.6

Bendungan Waduk PLTA Saguling 4x175 MW dan tampak *Rock Fill Dam* (sisi kiri) dan Pelimpahan (bagian tengah) Serta Pintu Air untuk Keamanan



Gambar III.7  
Intake PLTA di Jawa Barat dengan Kapasitas 4x175 MW



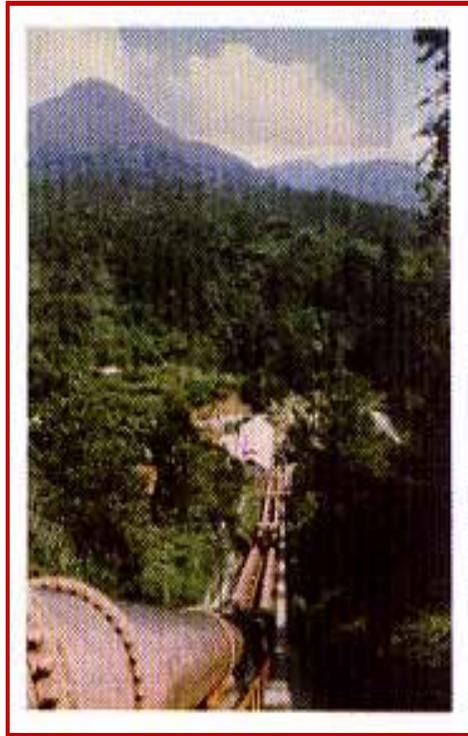
Gambar III.8  
Pipa Pesat dan Gedung PLTA di Jawa Barat

## 2. Macam-Macam Turbin Air

Ditinjau dari teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin, ada tiga macam turbin air yaitu:

### a. Turbin Kaplan.

Turbin Kaplan digunakan untuk tinggi terjun yang rendah, yaitu di bawah 20 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik roda air turbin dilakukan melalui pemanfaatan kecepatan air. Roda air turbin Kaplan menyerupai baling-baling dari kipas angin. Turbin Kaplan ditunjukkan pada Gambar III.11.

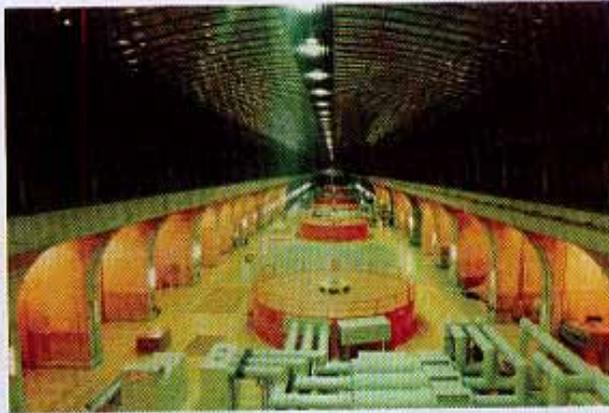


Gambar III.9  
Pipa Pesat PLTA Lamojan

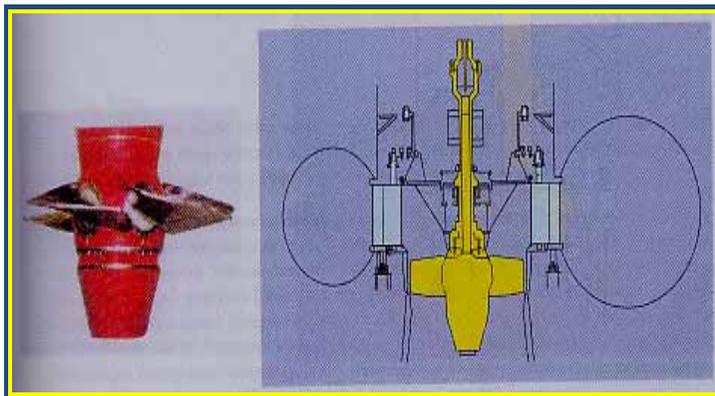
#### **b. Turbin Francis**

Turbin Francis paling banyak digunakan di Indonesia. Turbin ini digunakan untuk tinggi terjun sedang, yaitu antara 20-400 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses reaksi sehingga turbin Francis juga disebut sebagai turbin reaksi.

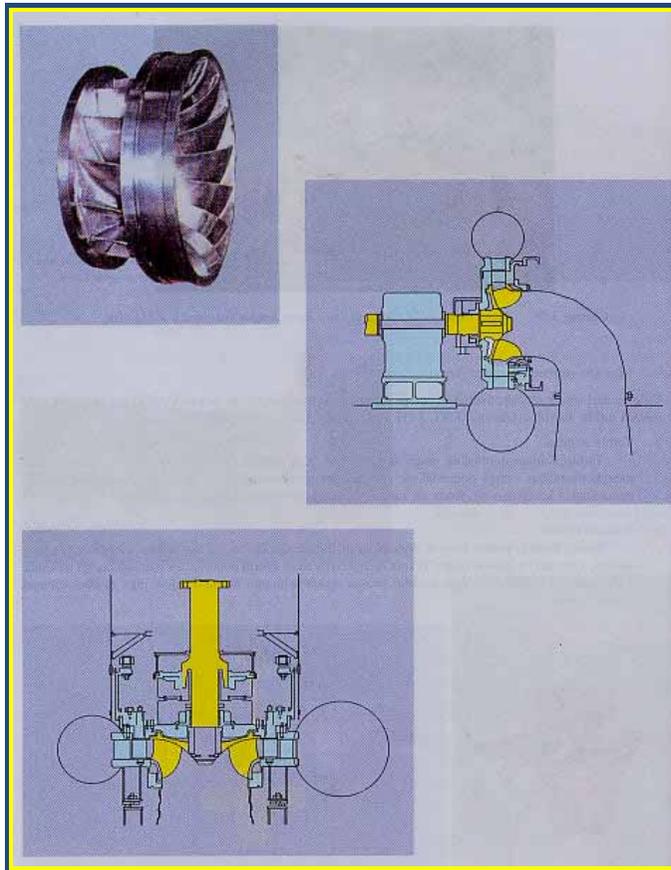
Turbin Francis ditunjukkan pada Gambar III.12, III.13 dan III.14.



Gambar 3.3F Ruang turbin PLTA Gambar III.10 dengan kapasitas  $6 \times 151$  MW.  
Ruang turbin PLTA Cirata di Jawa Barat dengan kapasitas  $6 \times 151$  MW



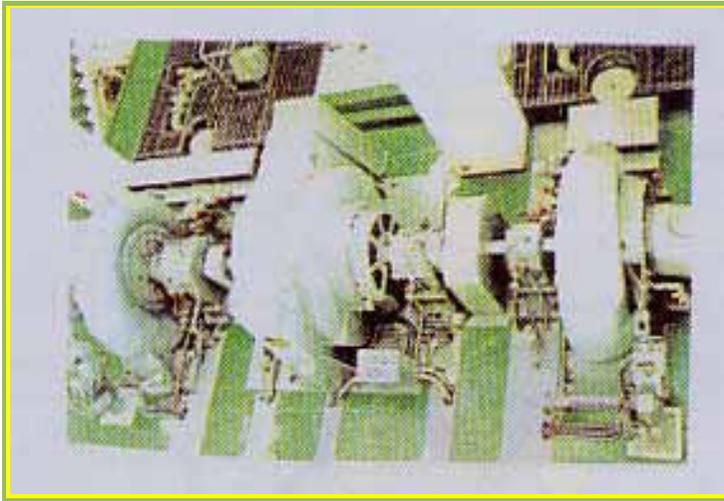
Gambar III.11  
Turbin Kaplan



Gambar III.12  
Turbin Francis Buatan Toshiba



Gambar III.13  
Turbin Francis dan generator 3600 M



Gambar III.14

Turbin Francis dan Generator 4190 M

### c. Turbin Pelton.

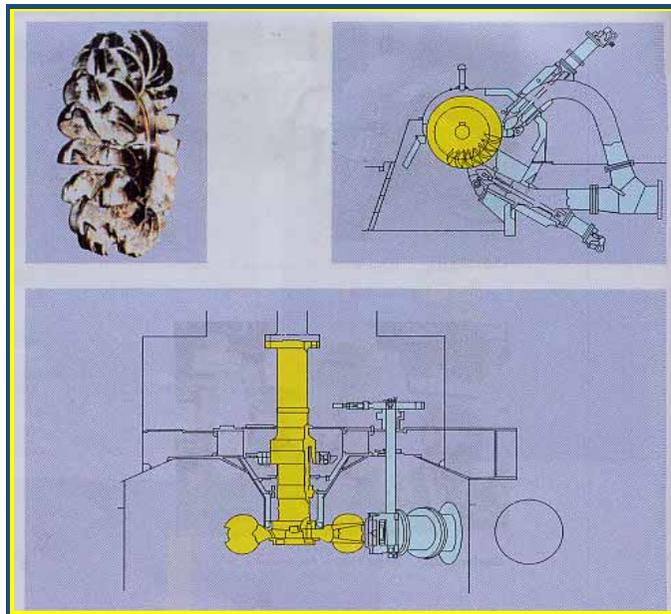
Turbin Pelton adalah turbin untuk tinggi terjun yang tinggi, yaitu di atas 300 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses impuls sehingga turbin Pelton juga disebut sebagai turbin impuls, yang ditunjukkan pada Gambar III.15.

Untuk semua macam turbin air tersebut di atas, ada katup pengatur yang mengatur banyaknya air yang akan dialirkan ke roda air. Dengan pengaturan air ini, daya turbin dapat diatur. Di depan katup pengatur terdapat katup utama yang harus ditutup apabila turbin air dihentikan untuk melaksanakan pekerjaan pemeliharaan atau perbaikan pada turbin. Apabila terjadi gangguan listrik yang menyebabkan PMT generator *trip*, maka untuk mencegah turbin berputar terlalu cepat karena hilangnya beban generator yang diputar oleh turbin, katup pengatur air yang menuju ke turbin harus ditutup. Penutupan katup pengatur ini akan menimbulkan gelombang air membalik yang dalam bahasa Inggris disebut *water hammer* (palu air). *Water hammer* ini menimbulkan pukulan mekanis kepada pipa pesat ke arah atas (hulu) yang akhirnya diredam dalam tabung peredam (*surge tank*).

Kecepatan spesifik (*specific speed*) turbin air didefinisikan sebagai jumlah putaran per menit [rpm] (*rotation per minute* [rpm]) dari turbin untuk menghasilkan satu daya kuda pada tinggi terjun  $H = 1$  meter.

Saluran air dari dam atau kolam tando sampai pada tabung peredam, panjangnya dapat mencapai beberapa kilometer.

Apabila saluran ini tidak rata, jalannya naik turun, maka di bagian-bagian cekungan yang rendah, harus ada katup untuk membuang endapan pasir atau lumpur yang terjadi di cekungan rendah tersebut. Di sisi lain, yaitu di bagian-bagian lengkungan yang tinggi juga harus ada katup, tetapi dalam hal ini untuk membuang udara yang terperangkap dalam lengkungan yang tinggi ini. Secara periodik, katup-katup tersebut di atas harus dibuka untuk membuang endapan yang terjadi maupun untuk membuang udara yang terperangkap.



Gambar III.15  
Turbin Pelton Buatan Toshiba

### 3. Operasi dan Pemeliharaan

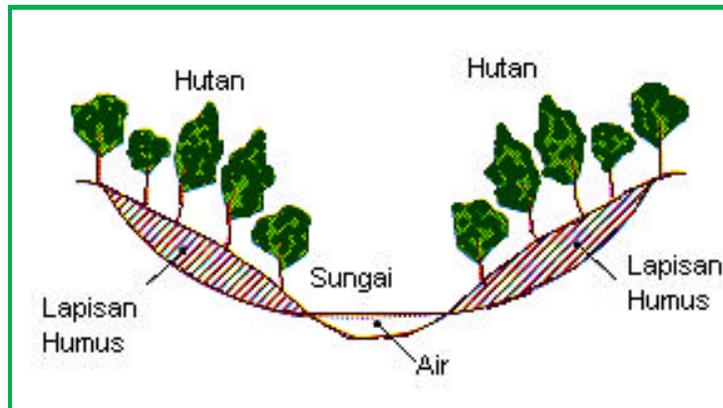
PLTA yang mempunyai kolam tando besar mempunyai fungsi serba guna di mana artinya selain berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik, PLTA ini juga berfungsi untuk menyediakan air irigasi, pengendalian banjir, perikanan, pariwisata, dan penyedia air bagi lalu lintas pelayaran sungai. Pada PLTA serba guna, pembangkitan tenaga listriknya perlu dikoordinasikan dengan keperluan irigasi dan musim tanam padi yang membutuhkan banyak air. Dari segi pengendalian banjir, PLTA serba guna harus dapat diatur air keluarnya sehingga pada saat banyak hujan tidak timbul banjir di sisi hilir. Contoh PLTA serba guna adalah PLTA Jatiluhur di Jawa Barat. Ditinjau dari *specific speed*, turbin Kaplan mempunyai *specific speed* terbesar, kemudian disusul oleh turbin Francis dan Pelton. Oleh karena itu, untuk terjun yang tinggi, misalnya 400 meter,

digunakan turbin Pelton agar jumlah putaran per menit yang didapat dari turbin tidak terlalu tinggi sehingga tidak timbul persoalan mekanik.

Dari uraian di atas, tampak bahwa pelestarian hutan di daerah aliran sungai (DAS), terutama di sisi hulu PLTA sangat penting bagi kelangsungan hidup PLTA. Apabila hutannya rusak, maka kemampuan tanah di DAS untuk menyimpan air akan turuti sehingga timbul banjir di waktu musim hujan dan di musim kemarau timbul kekeringan. Selain itu timbul erosi tanah sewaktu hujan yang akan mengendap dalam kolam tando sehingga terjadi pendangkalan kolam tando.

Dibandingkan dengan pusat listrik lainnya dengan daya yang sama, biaya operasi PLTA paling rendah. Tetapi biaya pembangunannya paling mahal. Salah satu faktor yang menyebabkan biaya pembangunan PLTA menjadi mahal, yaitu karena umumnya terletak di daerah pegunungan, jauh dari pusat konsumsi tenaga listrik (kota) sehingga memerlukan saluran transmisi yang panjang dan daerah genangan air yang luas di mana kedua hal tersebut memerlukan biaya pembangunan yang tidak sedikit. Dalam sistem interkoneksi di mana terdapat PLTA yang diinterkoneksikan dengan pusat-pusat listrik *thermis* yang menggunakan bahan bakar, ada kalanya dibangun PLTA pompa yang dapat memompa air ke atas. Hal ini baru ekonomis apabila biaya pembangkitan dalam sistem interkoneksi bersangkutan mempunyai variasi yang besar.

Pemompaan air dilakukan sewaktu biaya pembangkitan rendah, kemudian air hasil pemompaan ini digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik sewaktu biaya pembangkitan sistem interkoneksi mahal sehingga pembangkitan tenaga listrik dengan biaya yang mahal dapat dikurangi jumlahnya.



Gambar III.16  
Hutan Beserta Lapisan Humus & DAS

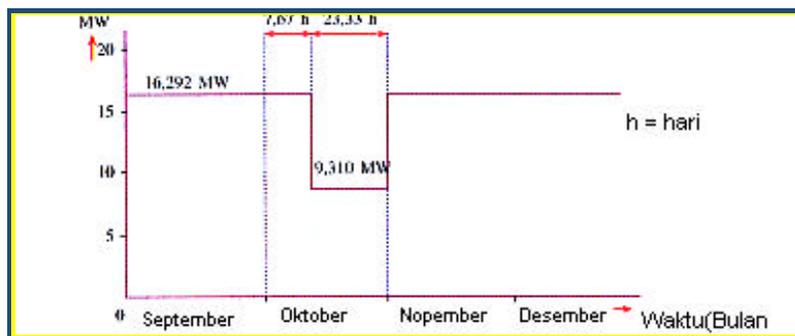
Keuntungan teknik operasional PLTA adalah

- mudah (cepat) di-*start* dan di-*stop*.
- bebannya mudah diubah-ubah.
- angka gangguannya rendah.
- pemeliharaannya mudah.
- umumnya dapat di-*start* tanpa daya dari luar (*black start*).

Masalah utama yang timbul pada operasi PLTA adalah timbulnya kavitasi pada turbin air. Kavitasi adalah peristiwa terjadinya letusan kecil dari gelembung uap air yang sebelumnya terbentuk di daerah aliran yang tekanannya lebih rendah daripada tekanan uap air ditempat tersebut; kemudian gelembung uap air ini akan menciut secara cepat meletus ketika uap air ini melewati daerah aliran yang tekanannya lebih besar daripada tekanan uap air tersebut, karena jumlahnya sangat banyak sekali (ribuan per detik) dan 1 letusan itu sangat cepat maka permukaan turbin yang dikenai oleh letusan ini akan terangkat sehingga terjadi burik yang menyebabkan bagian-bagian turbin air (setelah waktu tertentu, kira-kira 40.000 jam) menjadi keropos dan perlu diganti. Kavitasi terjadi di bagian-bagian turbin yang mengalami perubahan tekanan air secara mendadak, misalnya pada pipa buangan air turbin. Kavitasi menjadi lebih besar apabila beban turbin makin kecil. Oleh karena itu, ada pembatasan beban minimum turbin air (kira-kira 25%). Bagian terbesar dari biaya pemeliharaan PLTA adalah biaya perbaikan atau penggantian bagian-bagian turbin air yang menjadi keropos akibat kavitasi. Di Indonesia, enceng gondok sering menimbulkan penyumbatan saringan air dan menaikkan penguapan dari kolam tando sehingga merupakan salah satu masalah operasi PLTA, namun sekarang sudah banyak dimanfaatkan manusia sehingga enceng gondok tidak terlalu mengganggu.

PLTA kecil dengan daya terpasang di bawah 100 M, biasanya disebut sebagai Pusat Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTM). PLTM banyak dibangun, terutama di pedesaan. PLTM secara ekonomis bisa menguntungkan apabila didapatkan tempat (*site*) air terjun yang baik, dalam arti bangunan sipilnya bisa sederhana dan murah, kemudian bagian elektromekaniknya dibuat otomatis sehingga biaya personilnya murah. Di daerah yang ada Jaringan perusahaan listrik, PLTM bisa diparalel dengan jaringan listrik yang ada. Pada pemanfaatan tinggi terjun yang rendah, untuk PLTM dapat digunakan turbin Kaplan dengan generator yang direndam dalam aliran air untuk menyederhanakan bangunan sipil yang disebut *bulb* per unit. Karena PLTM sebaiknya tidak dijaga, maka untuk memudahkan proses sinkronisasi pada operasi paralel dengan sistem interkoneksi dapat digunakan generator asinkron. Ada juga PLTA yang menggunakan tenaga air dari pasang surutnya air laut, misalnya di Perancis.

Efisiensi turbin bersama generator unit PLTA dapat mencapai nilai sekitar 95%. Efisiensi keseluruhan dari PLTA dan instalasi listriknya, termasuk energi untuk pemakaian sendiri, angkanya berkisar antara 85-92%. Lancarnya aliran air dalam instalasi air PLTA sangat mempengaruhi efisiensi PLTA. Oleh karena itu, harus diusahakan agar aliran bersifat laminar (memiliki turbulensi). Untuk itu harus dihindari tikungan yang tajam dalam instalasi air PLTA, karena tikungan yang tajam, pada saluran air akan menimbulkan turbulensi yang akan menurunkan nilai  $H$  dan juga nilai  $q$ .



Gambar III.17

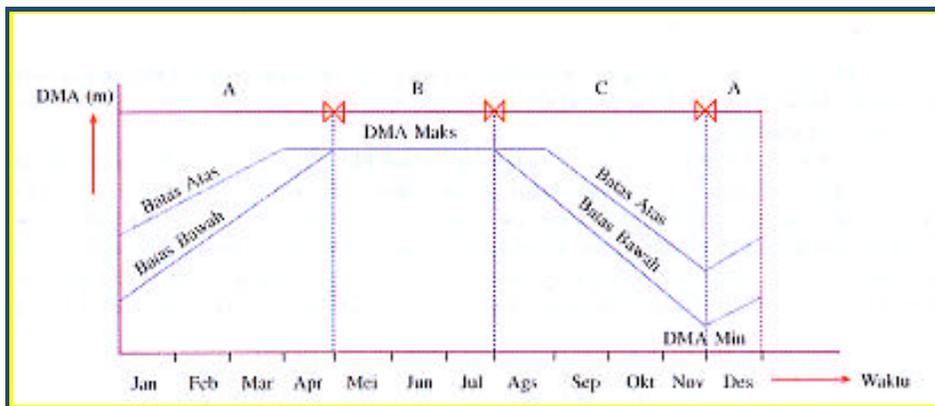
Pembebanan PLTA di mana Beban Diusahakan Maksimal tetapi Disesuaikan dengan Tersedianya Air

Energi yang dihasilkan PLTA tergantung dari jumlah air yang tersedia, jadi tergantung pada jumlah curah hujan dan kemampuan kolam tando menampung air sewaktu musim hujan.

Karakteristik musim hujan setiap tahun adalah berbeda, ada tahun basah dan ada tahun kering. Karakteristik tahun basah atau kering ini berulang setiap 8-10 tahun. Apabila jumlah curah hujan lebih besar dari pada yang digambarkan oleh Gambar III.18 ada kemungkinan kolam tando tidak bisa menampung air yang masuk sehingga terjadi pelimpasan (pembuangan) air.

Sebaliknya apabila curah hujan yang terjadi lebih sedikit daripada yang digambarkan oleh Gambar III.18, tahunnya lebih kering, maka periode di mana PLTA tidak bisa berbeban penuh karena kekurangan air akan berlangsung lebih lama dari pada 7,67 hari

Untuk dapat memanfaatkan air yang masuk ke kolam tando dengan sebaik-baiknya, sedapat mungkin tidak ada yang terbuang tetapi juga aman bagi bangunan sipil kolam tando, perlu ada suatu pola pengendalian kolam.



Gambar III.18  
Duga Muka Air Kolam

Tinggi muka air atau duga muka air (DMA) dalam kolam (waduk) diukur dengan skala meter. Pola pengendalian isi kolam ditunjukkan dengan DMA yang diinginkan.

Penentuan DMA minimum pada akhir periode pengosongan C atau permulaan periode pengisian harus memperhatikan masalah air masuk ke lubang *intake* PLTA yang terlalu rendah sehingga udara ikut masuk. Udara yang masuk bisa mengganggu operasi PLTA.

Sebaliknya penentuan DMA minimum yang terlalu tinggi bisa mengurangi volume kolam untuk periode pengisian yang bisa menyebabkan akan banyak air yang melimpas/dibuang pada periode B, yaitu periode DMA maksimum. B menggambarkan periode DMA maksimum. Apabila permukaan air telah mencapai DMA maksimum tetapi masih ada air masuk ke dalam kolam (waduk) maka air secara otomatis akan melimpas dan terbuang. Pelimpasan ini perlu untuk mengamankan bangunan sipil kolam/waduk, jangan sampai terjadi *over topping* yang bisa menyebabkan jebolnya kolam/waduk. *Over topping* terjadi apabila kolam/waduk isinya sudah penuh tetapi air masuk masih terus berlangsung sehingga air tidak hanya melimpas di tempat pelimpasan yang terbuat dari beton, tetapi juga melimpas di bagian bendungan yang terbuat dari batu dan pasir (*rock fill*), sehingga batu dan pasir di bagian bendungan ini jebol. C menggambarkan periode pengosongan kolam/waduk yang dimulai pada akhir bulan Juli yaitu perkiraan nilainya musim kemarau.

DMA dalam periode A dan periode C harus diatur agar berada diantara batas atas dan batas bawah. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur pengeluaran air dari kolam/waduk. Kolam/waduk dilengkapi dengan lubang pengeluaran air ekstra di samping tempat pelimpasan yang terbuat dari beton. Hal ini diperlukan untuk pengamanan kolam/waduk.

Ada kolam/waduk yang mempunyai fungsi serba guna seperti waduk PLTA Jatiluhur, yaitu untuk: Pengairan sawah, menghasilkan padi. Pembangkitan tenaga listrik. Pengendalian banjir. Lalu lintas kapal, Pariwisata.

Akhir-akhir ini waduk PLTA digunakan juga untuk pemeliharaan ikan dalam keramba.

Dalam hal yang demikian maka pengendalian DMA harus memperhatikan fungsi-fungsi tersebut di atas.

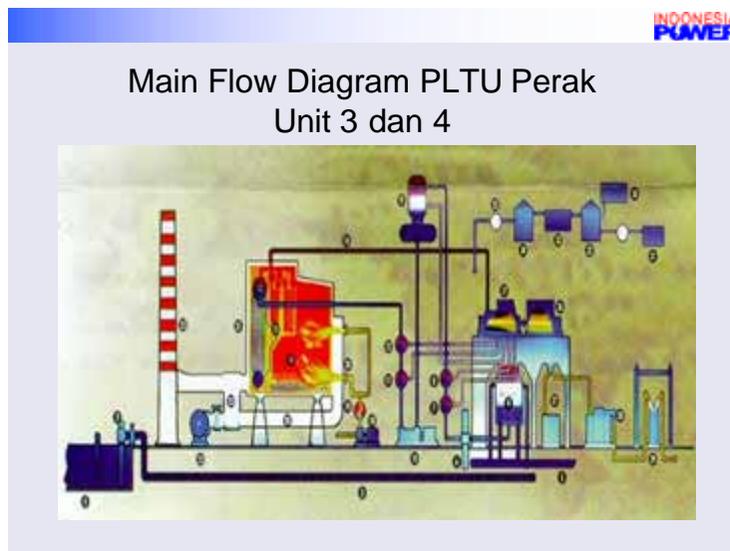
Untuk beberapa PLTA yang ada dalam hubungan kaskade (mempunyai satu sungai penggerak dan masing-masing mempunyai kolam/waduk), maka pengendalian DMA dalam kolam-kolam PLTA kaskade ini harus dilakukan sedemikian rupa hingga dicapai penggunaan yang optimum.

## **B. Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

### **1. Konversi Energi**

Dalam PLTU, energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), atau gas. Ada kalanya PLTU menggunakan kombinasi beberapa macam bahan bakar.

Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi primer menjadi energi panas (kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam pipa ketel untuk menghasilkan uap yang dikumpulkan dalam drum dari ketel. Uap dari drum ketel dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan akhirnya energi mekanis dari turbin uap ini dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Secara skematis, proses tersebut di atas digambarkan oleh Gambar III.19



Gambar III.19

Siklus uap dan air yang berlangsung dalam PLTU, yang dayanya relatif besar, di atas 200 MW

Gambar III.19 menggambarkan siklus uap dan air yang berlangsung dalam PLTU, yang dayanya relatif besar, di atas 200 MW. Untuk PLTU ukuran ini, PLTU umumnya memiliki pemanas ulang dan pemanas awal serta mempunyai 3 turbin yaitu turbin tekanan tinggi, turbin tekanan menengah, dan turbin tekanan rendah. Bagian yang menggambarkan sirkuit pengolahan untuk suplai dihilangkan untuk penyederhanaan sedangkan suplai air diperlukan karena adanya kebocoran uap pada

sambungan-sambungan pipa uap dan adanya *blow down* air dari drum ketel.

Air dipompakan ke dalam drum dan selanjutnya mengalir ke pipa-pipa air yang merupakan dinding yang mengelilingi ruang bakar ketel. Ke dalam ruang bakar ketel disemprotkan bahan bakar dan udara pembakaran. Bahan bakar yang dicampur udara ini dinyalakan dalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran dalam ruang. Pembakaran bahan bakar dalam ruang bakar mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas (kalor). Energi panas hasil pembakaran ini dipindahkan ke air yang ada dalam pipa air melalui proses radiasi, konduksi, dan konveksi.

Untuk setiap macam bahan bakar, komposisi perpindahan panas berbeda, misalnya bahan bakar minyak banyak memindahkan kalori hasil pembakarannya melalui radiasi dibandingkan bahan bakar lainnya. Untuk melaksanakan pembakaran diperlukan oksigen yang diambil dari udara. Oleh karena itu, diperlukan pasokan udara yang cukup dalam ruang bakar. Untuk keperluan memasok udara dalam ruang bakar, diperlukan kipas (*ventilator*) tekan dan kipas isap yang dipasang masing-masing pada ujung masuk udara ke ruang bakar dan pada ujung keluar udara dari ruang bakar.

Gas hasil pembakaran dalam ruang bakar setelah setelah diberi "kesempatan" memindahkan energi panasnya ke air yang ada di dalam pipa air ketel, dialirkan melalui saluran pembuangan gas buang untuk selanjutnya dibuang ke udara melalui cerobong. Gas buang sisa pembakaran ini masih mengandung banyak energi panas karena tidak semua energi panasnya dapat dipindahkan ke air yang ada dalam pipa air ketel. Gas buang masih mempunyai suhu di atas  $400^{\circ}\text{C}$  ini dimanfaatkan untuk memanasi: (lihat Gambar III.19)

#### a. Pemanas Lanjut (*Super Heater*)

Di dalam pemanas lanjut, mengalir uap dari drum ketel yang menuju ke turbin uap tekanan tinggi. Uap yang mengalir dalam pemanas lanjut ini mengalami kenaikan suhu sehingga uap air ini semakin kering, oleh karena adanya gas buang di sekeliling pemanas lanjut.

#### b. Pemanas Ulang (*Reheater*).

Uap yang telah digunakan untuk menggerakkan turbin tekanan tinggi, sebelum menuju turbin tekanan menengah, dialirkan kembali melalui pipa yang dikelilingi oleh gas buang. Di sini uap akan mengalami kenaikan suhu yang serupa dengan pemanas lanjut.

### c. *Economizer*.

Air yang dipompakan ke dalam ketel, terlebih dahulu dialirkan melalui *economizer* agar mendapat pemanasan oleh gas buang. Dengan demikian suhu air akan lebih tinggi ketika masuk ke pipa air di dalam ruang bakar yang selanjutnya akan mengurangi jumlah kalori yang diperlukan untuk penguapan (lebih ekonomis).

### d. Pemanas Udara.

Udara yang akan dialirkan ke ruang pembakaran yang digunakan untuk membakar bahan bakar terlebih dahulu dialirkan melalui pemanas udara agar mendapat pemanasan oleh gas buang sehingga suhu udara pembakaran naik yang selanjutnya akan mempertinggi suhu nyala pembakaran.

Dengan menempatkan alat-alat tersebut di atas dalam saluran gas buang, maka energi panas yang masih terkandung dalam gas buang dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin. Sebelum melalui pemanas udara, gas buang diharapkan masih mempunyai suhu di atas suhu pengembunan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ), yaitu sekitar  $1800^{\circ}C$ . Hal ini perlu untuk menghindari terjadinya pengembunan asam sulfat di pemanas udara. Apabila hal ini terjadi, maka akan terjadi korosi pada pemanas udara dan pemanas udara tersebut akan menjadi rusak (keropos).

Energi panas yang timbul dalam ruang pembakaran sebagai hasil pembakaran, setelah dipindahkan ke dalam air yang ada dalam pipa air ketel, akan menaikkan suhu air dan menghasilkan uap. Uap ini dikumpulkan dalam drum ketel. Uap yang terkumpul dalam drum ketel mempunyai tekanan dan suhu yang tinggi di mana bisa mencapai sekitar  $100\text{ kg/cm}$  dan  $530^{\circ}C$ . Energi uap yang tersimpan dalam drum ketel dapat digunakan untuk mendorong atau memanasi sesuatu (uap ini mengandung *enthalpy*). Drum ketel berisi air di bagian bawah dan uap yang mengandung *enthalpy* di bagian atas.

Uap dari drum ketel dialirkan ke turbin uap, dan dalam turbin uap, energi (*enthalpy*) dari uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator. Turbin pada PLTU besar, di atas 150 MW, umumnya terdiri dari 3 kelompok, 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 agar uapnya menjadi kering. Setelah keluar dari turbin tekanan tinggi, uap dialirkan ke pemanas ulang untuk menerima energi panas dari gas buang sehingga suhunya naik. 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 pendingin untuk mengembunkan uap yang keluar dari turbin tekanan rendah. Oleh karena itu, banyak PLTU dibangun di pantai, karena dapat menggunakan air laut sebagai air pendingin kondensor dalam jumlah yang besar. Di lain pihak, penggunaan air laut sebagai air pendingin menimbulkan masalah-masalah sebagai berikut:

- 1) Material yang dialiri air laut harus material anti korosi (tahan air laut).
- 2) Binatang laut ikut masuk dan berkembang biak dalam saluran air pendingin yang memerlukan pembersihan secara periodik.
- 3) Selain binatang laut, kotoran air laut juga ikut masuk dan akan menyumbat pipa-pipa kondensor sehingga diperlukan pembersihan pipa kondensor secara periodik.
- 4) Ada risiko air laut masuk ke dalam sirkuit uap. Hal ini berbahaya bagi sudu-sudu turbin uap. Oleh karena itu, harus dicegah.

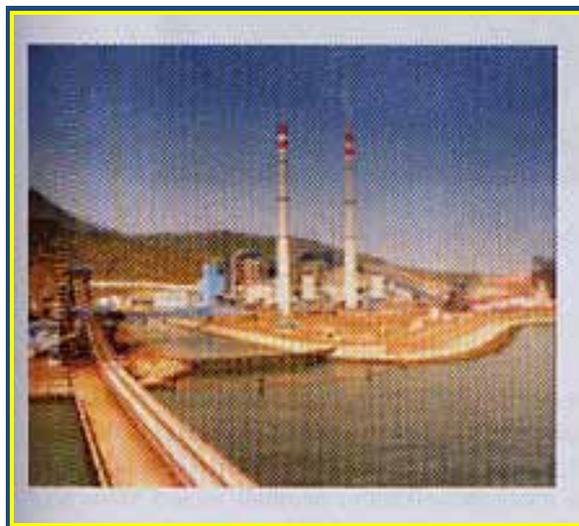
Setelah air diembunkan dalam kondensor, air kemudian dipompa ke tangki pengolah air. Dalam tangki pengolah air, ada penambahan air untuk mengkompensasi kehilangan air yang terjadi karena kebocoran. Dalam tangki pengolah air, air diolah agar memenuhi mutu yang diinginkan untuk air ketel. Mutu air ketel antara lain menyangkut kandungan NaCl, CO<sub>2</sub>, dan derajat keasaman (pH). Dari tangki pengolah air, air dipompa kembali ke ketel, tetapi terlebih dahulu melalui *Economizer*. Dalam *Economizer*, air mengambil energi panas dari gas buang sehingga naik, kemudian baru mengalir ke ketel uap.

Pada PLTU yang besar, di atas 150 MW, biasanya digunakan pemanas awal ke *heater*, yaitu pemanas yang akan masuk ke *economizer* sebelum masuk ke ketel uap. Pemanas awal ini ada 2 buah, masing-masing menggunakan uap yang diambil (di-tap) dari turbin tekanan menengah dan dari turbin tekanan rendah sehingga didapat pemanas awal tekanan menengah dan pemanas awal tekanan rendah.

Gambar III.20, sampai III.25 adalah foto-foto dari berbagai bagian PLTU.



Gambar III.20  
Coal Yard PLTU Surabaya



Gambar III.21  
PLTU Paiton Milik PLN



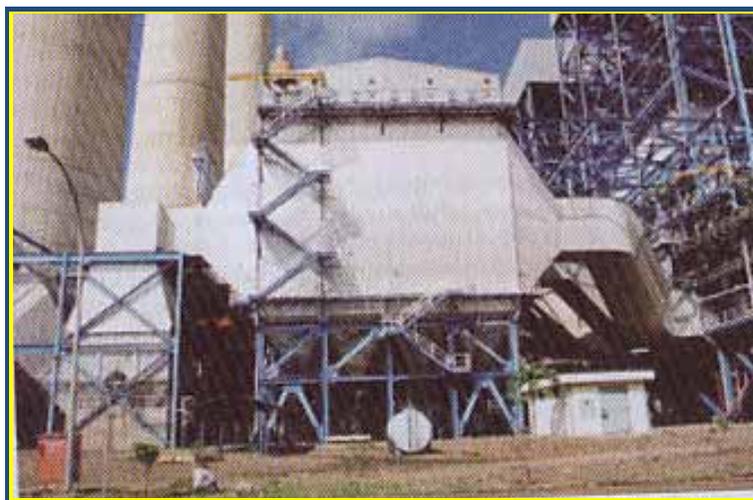
Gambar III.22  
Ruang Turbin PLTU Surabaya



Gambar III.23  
Unit 400 MW PLTU Paiton Milik PLN Jawa Timur



Gambar III.24  
Unit 400 MW PLTU Paiton Milik PLN 36 Sudu Jalur Jawa Timur



Gambar III.25  
Generator dan Turbin 400 MW di Jawa Barat

## 2. Masalah Operasi

Untuk men-*start* PLTU dari keadaan dingin sampai operasi dengan beban penuh, dibutuhkan waktu antara 6-8 jam. Jika PLTU yang telah beroperasi dihentikan, tetapi uapnya dijaga agar tetap panas dalam drum ketel dengan cara tetap menyalakan api secukupnya untuk menjaga suhu dan tekanan uap ada di sekitar nilai operasi (yaitu sekitar  $500^{\circ}\text{C}$  dan sekitar  $100\text{ kg/cm}^2$ ) maka untuk mengoperasikannya kembali sampai beban penuh diperlukan waktu kira-kira 1 jam. Waktu yang lama untuk mengoperasikan PLTU tersebut di atas terutama diperlukan untuk menghasilkan uap dalam jumlah yang cukup untuk operasi (biasanya dinyatakan dalam ton per jam).

Selain waktu yang diperlukan untuk menghasilkan uap, yang cukup untuk operasi, juga perlu diperhatikan masalah pemuaian bagian-bagian turbin. Sebelum di-*start*, suhu turbin adalah sama dengan suhu ruangan.



Gambar III.26  
Turbin Uap dan Kondensor



Gambar III.27  
Boiler PLTU Perak

Pada waktu *start*, dialirkan uap dengan suhu sekitar  $500^{\circ}\text{C}$ . Hal ini harus dilakukan secara bertahap agar jangan sampai terjadi pemuaian yang berlebihan dan tidak merata. Pemuaian yang berlebihan dapat menimbulkan tegangan mekanis (*mechanical stress*) yang berlebihan, sedangkan pemuaian yang tidak merata dapat menyebabkan bagian yang bergerak (berputar) bergesekan dengan bagian yang diam, misalnya antara sudu-sudu jalan turbin dengan sudu-sudu tetap yang menempel pada rumah turbin.

Apabila turbin sedang berbeban penuh kemudian terjadi gangguan yang menyebabkan pemutus tenaga, (PMT) generator yang digerakkan turbin *trip*, maka turbin kehilangan beban secara mendadak. Hal ini menyebabkan putaran turbin akan naik secara mendadak dan apabila hal ini tidak dihentikan, maka akan merusak bagian-bagian yang berputar pada turbin maupun pada generator, seperti: bantalan, sudu jalan turbin, dan kumparan arus searah yang ada pada rotor generator. Untuk mencegah hal ini, aliran uap ke turbin harus dihentikan, yaitu dengan cara menutup katup uap turbin. Pemberhentian aliran uap ke turbin dengan menutup katup uap turbin secara mendadak menyebabkan uap mengumpul dalam drum ketel sehingga tekanan uap dalam drum ketel naik dengan cepat dan akhirnya menyebabkan katup pengaman pada drum membuka dan uap dibuang ke udara. Bisa juga sebagian dari uap di *by pass* ke kondensor. Dengan cara *by pass* ini tidak terlalu banyak uap yang hilang sehingga sewaktu turbin akan dioperasikan kembali banyak waktu dapat dihemat untuk start. Tetapi sistem *by pass*

memerlukan biaya investasi tambahan karena kondensor harus tahan suhu tinggi dan tekanan tinggi dari *by pass*.

Dari uraian di atas tampak bahwa perubahan beban secara mendadak memerlukan pula langkah pengurangan produksi uap secara mendadak agar tidak terlalu banyak uap yang harus dibuang ke udara. Langkah pengurangan fluksi dilakukan dengan mematikan nyala api dalam ruang bakar ketel dan mengurangi pengisian air ketel ini bahwa walaupun nyala api dalam ruang bakar padam, masih cukup banyak panas yang tinggal dalam ruang bakar untuk menghasilkan uap sehingga pompa pengisi ketel harus tetap mengisi air ke dalam ketel untuk mencegah penurunan level air dalam drum yang tidak dikehendaki.

Mengingat masalah-masalah tersebut di atas yang menyangkut masalah proses produksi uap dan masalah-masalah pemuaian yang terjadi dalam turbin, sebaiknya PLTU tidak dioperasikan dengan persentase perubahan-perubahan beban yang besar.

Efisiensi PLTU banyak dipengaruhi ukuran PLTU, karena ukuran PLTU menentukan ekonomis tidaknya penggunaan pemanas ulang dan pemanas awal. Efisiensi *thermis* dari PLTU berkisar pada angka 35-38%.

### 3. Pemeliharaan

Bagian-bagian PLTU yang memerlukan pemeliharaan secara periodik adalah bagian-bagian yang berhubungan dengan gas buang dan air pendingin, yaitu pipa-pipa air, ketel uap dan pipa-pipa air pendingin termasuk pipa kondensor. Pipa-pipa semua memerlukan pembersihan secara periodik.

Pada pipa air ketel umumnya banyak abu yang menempel dan perlu dibersihkan agar proses perpindahan panas dari ruang bakar ke air melalui dinding pipa tidak terhambat. Walaupun telah ada *soot blower* yang dapat digunakan untuk menyemprotkan air pembersih pada pipa air ketel, tetapi tidak semua bagian pipa air ketel uap dapat dijangkau oleh air pembersih *soot blower* ini sehingga diperlukan kesempatan untuk pembersihan bagian yang tidak teryangkau oleh *soot blower* tersebut. Saluran air pendingin, terutama jika menggunakan air laut, umumnya ditempeli binatang laut yang berkembang biak dan juga ditempeli kotoran air laut sehingga luas penampang efektif dari saluran tersebut menurun. Untuk mengurangi binatang laut ini ada *chlorination plant* yang menyuntikkan gas klor ke dalam air pendingin (air laut) ini. Oleh karena itu, secara periodik saluran air pendingin (baik yang berupa saluran terbuka maupun pipa) luar secara periodik dibersihkan. Pipa kondensor yang juga dilalui air pendingin, dan karena penampangnya kecil, pipa ini

juga memerlukan pembersihan yang lebih sering dari pada bagian saluran air pendingin yang lain.

Untuk pembersihan pipa air kondensor tidak memerlukan penghentian operasi dari unit pembangkitnya, hanya memerlukan penurunan beban karena pipa kondensor dapat dibersihkan secara bertahap.

Pipa kondensor PLTU yang digunakan ada yang terbuat dari tembaga dan ada yang terbuat dari titanium.

Daya hantar panas tembaga lebih baik daripada titanium, tetapi kekuatan mekanisnya tidak sebaik titanium. Oleh karena itu, pada unit PLTU yang besar, misalnya pada Unit 400 MW, digunakan pipa titanium karena diperlukan pipa yang panjang. Karena daya hantar panas titanium tidak sebaik daya hantar panas tembaga, maka soal kebersihan dinding pipa titanium lebih memerlukan perhatian dari pada pipa tembaga. Itulah sebabnya, pada penggunaan pipa titanium dilengkapi dengan bola-bola pembersih.

Sambungan pipa kondensor dengan dindingnya merupakan bagian yang rawan terhadap kebocoran. Apabila terjadi kebocoran, maka air laut yang mengandung NaCl masuk ke dalam sirkuit air ketel dan sangat berbahaya bagi ketel uap maupun bagi turbin. Tingkat kebocoran ini dapat dilihat dari daya hantar listrik air ketel. Apabila daya hantar listrik ini tinggi, hal ini berarti bahwa tingkat kebocoran kondensor tinggi.

Semua peralatan yang ada dalam saluran gas buang perlu dibersihkan secara periodik, yaitu pemanas lanjut, pemanas ulang, *economizer*, dan pemanas udara.

Bagian-bagian PLTU lain yang rawan kerusakan dan perlu perhatian/pengecekan periodik adalah:

- a. Bagian-bagian yang bergeser satu sama lain, seperti bantalan dan roda gigi.
- b. Bagian yang mempertemukan dua zat yang suhunya berbeda, misalnya kondensor dan penukar panas (*heat exchanger*).
- c. Kotak-kotak saluran listrik dan saklar-saklar.

Karena sebagian besar dari pekerjaan pemeliharaan tersebut di atas memerlukan penghentian operasi unit yang bersangkutan apabila dilaksanakan, maka pekerjaan-pekerjaan tersebut dilakukan sekaligus

sewaktu unit menjalani *overhaul* yang dilakukan secara periodik yakni sekali dalam 10.000 jam operasi untuk waktu kira-kira 3 minggu.

Dibandingkan dengan ketel uap, turbin uap tidak banyak memerlukan pemeliharaan asal saja kualitas uap terjaga dengan baik. Oleh karena itu, pemeriksaan turbin uap dapat dilakukan dalam setiap 20.000 jam operasi.

#### 4. Penyimpanan Bahan Bakar

Karena banyaknya bahan bakar yang ditimbun di PLTU, maka perlu perhatian khusus mengenai pengelolaan penimbunan bahan bakar agar tidak terjadi kebakaran. Seharusnya di sekeliling tangki BBM dibangun bak pengaman yang berupa dinding tembok. Volume bak pengaman ini harus sama dengan volume tangki sehingga kalau terjadi kebocoran besar, BBM ini tidak mengalir ke mana-mana karena semuanya tertampung oleh bak pengaman tersebut.

Pada penimbunan batubara, harus dilakukan pembalikan serta penyiraman batubara agar tidak terjadi penyalaan sendiri.

Pada penimbunan bahan bakar minyak (BBM), harus dicegah terjadinya kebocoran yang dapat mengalirkan BBM tersebut ke bagian instalasi yang bersuhu tinggi sehingga dapat terjadi kebakaran.

Pada penggunaan gas sebagai bahan bakar, pendeteksian kebocoran bahan bakar gas (BBG) lebih sulit dibandingkan dengan kebocoran bahan bakar minyak (BBM). Oleh karena itu, pada penggunaan gas, alat-alat pendeteksian kebocoran harus dapat diandalkan untuk mencegah terjadinya kebakaran.

Pengawasan kebocoran gas hidrogen yang digunakan sebagai bahan pendingin generator serupa dengan pengawasan kebocoran BBG, mengingat gas hidrogen juga mudah terbakar.

Karena risiko terjadinya kebakaran pada PLTU besar, maka harus ada instalasi pemadam kebakaran yang memadai dan personel perlu dilatih secara periodik untuk menghadapi kemungkinan terjadinya kebakaran.

#### 5. Ukuran PLTU

Dari uraian dalam beberapa sub bab terdahulu, tampak bahwa dalam instalasi PLTU terdapat banyak peralatan.

Faktor utama yang menentukan ukuran PLTU yang dapat dibangun adalah tersedianya bahan bakar dan air pendingin, selain tanah yang cukup luas. Mengingat hal-hal ini, maka PLTU baru ekonomis dibangun

dengan daya terpasang di atas 10 MW per unitnya. Semakin besar daya terpasangnya, semakin ekonomis. Secara teknis, PLTU dapat dibangun dengan daya terpasang di atas 1.000 MW per unitnya. Unit PLTU milik PLN yang terbesar saat ini adalah 600 MW di Suralaya, Jawa Barat.

## 6. Masalah Lingkungan

Gas buang yang keluar dari cerobong PLTU mempunyai potensi mencemari lingkungan. Oleh karena itu, ada penangkap abu agar pencemaran lingkungan dapat dibuat minimal. Selain abu halus yang ditangkap di cerobong, ada bagian-bagian abu yang relatif besar, jatuh dan ditangkap di bagian bawah ruang bakar. Abu dari PLTU, baik yang halus maupun yang kasar, dapat dimanfaatkan untuk bahan bangunan sipil. Walaupun abunya telah ditangkap, gas buang yang keluar dari cerobong masih mengandung gas-gas yang kurang baik bagi kesehatan manusia, seperti  $S_{O_2}$ ,  $NO_x$ , dan  $CO_2$ . Kadar dari gas-gas ini tergantung kepada kualitas bahan bakar, khususnya batubara yang digunakan. Bila perlu, harus dipasang alat penyaring gas-gas ini agar kadarnya yang masuk ke udara tidak melampaui batas yang diizinkan oleh pernerintah.

## 7. Penggunaan Bahan Kimia

Pada PLTU, digunakan bahan kimia yang dapat menimbulkan masalah lingkungan. Bahan-bahan kimia tersebut digunakan pada:

a. Air pendingin dari air laut, untuk membunuh binatang dan tumbuhan laut agar tidak menyumbat saluran air pendingin. Air pendingin dari air laut diperlukan dalam jumlah besar, yaitu beberapa ton per detik. Air laut mengandung berbagai bakteri (mikroorganisme) yang dapat tumbuh sebagai tanaman dan menempel pada saluran sehingga mengurangi efektivitas dan efisiensi sistem pendinginan PLTU. Untuk mengurangi pengaruh mikro-organisme ini ke dalam saluran air disuntikkan gas klor ( $Cl_2$ ) untuk membunuh mikroorganisme ini.

Penyuntikan gas klor ini tidak dilakukan secara kontinu untuk mencegah kekebalan mikroorganisme.

b. Air pengisi ketel, yang telah melalui *economizer*, suhunya bisa mencapai sekitar  $2000^{\circ}C$ . Untuk itu, air pengisi ketel sebelum melalui *economizer*, dalam pengolah air ketel, ditambah *soda lime* untuk mencegah timbulnya endapan pada pipa ketel uap. Bahan kimia ini akhirnya akan terkumpul dan harus dibuang secara periodik (*blow down*). Mutu air ketel harus dijaga agar tidak merusak bagian-bagian ketel maupun bagian-bagian turbin. Hal-hal yang harus dijaga adalah:

1). Kekerasan (*hardness*) dari air yang menyangkut kandungan garam kalsium dan magnesium. Pada umumnya kedua logam tersebut membentuk garam dengan karbonat, hidrat, sulfat, dan hidrokarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$ ). Garam-garam ini pada tekanan dan suhu tinggi mudah mengendap disebabkan kelarutannya yang kecil. Endapan akan menempel pada dinding dalam pipa ketel dan menjadikan lapisan isolasi kerak panas (*scaling*) sehingga mengurangi efisiensi ketel dan juga dapat menimbulkan pemanasan setempat yang berlebihan.

Untuk mencegah terjadinya endapan (*scaling*) ini, sebelum dipompakan ke *economizer*, air dilunakkan (*softening*) terlebih dahulu. Proses pelunakan ini menggunakan *soda lime* (campuran antara KOH dan atau NaOH dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) sehingga timbul reaksi kimia.

Setelah penambahan *soda lime*, dalam air ketel masih terkandung  $\text{CaSO}_4$  dan  $\text{CaCl}_2$  (hasil klorinasi). Untuk mengeliminasi garam-garam kalsium ini ditambahkan *soda ash* (kalsium karbonat =  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Setelah itu dilakukan filtrasi (penapisan) untuk menghilangkan garam-garam yang mengendap.

2). Gas dor ( $\text{Cl}$ ) yang sifatnya sangat korosif mungkin terbawa melalui kebocoran kondensor. Gas ini harus dibersihkan dari ketel. Seperti tersebut dalam butir a, air pendingin disuntik dengan gas klor sehingga dapat terjadi kebocoran ini. Untuk menangkap gas klor dapat digunakan filter arang.

3). Kotoran-kotoran lain yang terbawa dalam air pengisi ketel dapat disaring dengan saringan mekanis, misalnya pasir dan airnya diberi tekanan.

4). Untuk mencegah *scaling* (kerak) atau korosi oleh air pengisi ketel, nilai pH air pengisi ketel perlu dikontrol agar berada pada nilai antara 9.5 sampai 11. pH diatur dengan penambahan *buffer phospat*.

5). Misalnya bila terlalu tinggi maka dapat ditambahkan  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  atau  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , dan bila pH terlalu rendah dapat ditambahkan  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  pH diatur hingga mendekati 10. pH yang terlalu tinggi akan memicu terjadinya *scaling*. Alkalinitas yang tinggi disebabkan oleh berbagai macam unsur yang ada dalam air ketel di mana dapat menghasilkan buih dan menyebabkan *carry over*.

6). Jumlah mineral yang ada dalam air ketel dapat juga dikontrol dengan cara melakukan serangkaian proses demineralisasi. Kation seperti magnesium dan kalsium dapat dihilangkan dengan proses penukaran ion

dengan ion hidrogen, sementara anionnya tertinggal dalam air ketel dengan bentuk, misalnya asam sulfat  $H_2SO_4$ , asam klorida  $HCl$ , dan lain-lain. Bila air ketel kemudian dilewatkan dalam *vacuum deaerator* untuk mengurangi  $O_2$  dan  $CO_2$  kemudian dilewatkan lagi dalam proses penukar anion, maka asam-asam yang tertinggal dalam larutan akan dihilangkan dan menghasilkan air yang mungkin lebih murni dari air destilasi.

7). Kadar oksigen ( $O_2$ ) juga harus dibatasi karena  $O_2$  merusak ketel maupun turbin pada suhu di atas  $200^\circ C$ . Hal ini dilakukan dalam *deaerator* di mana air pengisi ketel disemprotkan menjadi butir-butir kecil dan dalam arah berlawanan (ke atas) disemprotkan uap panas yang akan menangkap  $OT$ .

Segala endapan yang terjadi pada proses pengolahan air pengisi ketel ini harus dibuang melalui proses *blow down* dari air drum ketel dan harus memenuhi syarat lingkungan.

Makin tinggi tekanan uap ketel, makin tinggi kemungkinan terjadi *scaling*. Begitu pula acuan ini mengajukan nilai pH air pengisi ketel sebaiknya antara 10 dan 11.

Penggunaan air murni hasil destilasi dalam *desalinization plant* sangat membantu pengolahan air pengisi ketel jika dibandingkan dengan penggunaan air sumur yang mengandung banyak macam zat.

PLTU yang menggunakan bahan bakar batubara menghasilkan 2 macam abu:

- Abu dari bagian bawah ruang bakar, bentuknya besar, bisa dijadikan bahan lapisan pereras jalan.
- Abu cerobong yang ditangkap oleh *electrostatic precipitator*, bisa dipakai sebagai bahan campuran beton.

Dari uraian di atas tampak bahwa abu yang merupakan limbah PLTU batubara dapat diproses sehingga menjadi produk tambahan.

## 8. Instalasi Pengolah Air Ketel

Adanya *blow down* air dari drum ketel untuk membuang bahan-bahan kimia menyebabkan perlu adanya suplesi air ketel. Suplai air ini bisa berasal dari Perusahaan Air Minum (PAM).

Air dari PAM walaupun layak minum bagi manusia belum tentu memenuhi syarat sebagai air ketel.

Sumur, yang dibuat dengan bor tanah. Air sumur ini umumnya membawa banyak mineral yang ada di dalam tanah seperti silika dan kalsium. Mineral-mineral ini bisa merusak ketel sehingga harus dibuang.

### 9. Air Laut yang Disuling (Didestilasi)

Penyulingan air laut ini dilakukan dalam *destalination plant*, di mana air laut diuapkan kemudian diembunkan kembali. Air hasil sulingan ini kemungkinan mengandung gas  $\text{Cl}_2$  dan  $\text{NaCl}$  yang sangat berbahaya bagi ketel, turbin dan bagian-bagian lain dari instalasi PLTU. Oleh karenanya harus dihindarkan keberadaannya dalam air ketel.

Dibanding dengan air yang berasal dari sumber-sumber tersebut di atas, air sungai atau air dari danau relatif paling banyak mengandung kotoran dan zat-zat yang tidak diinginkan sehingga proses pembersihannya paling sukar.

Instalasi pengolah air ketel berfungsi untuk membersihkan air yang berasal dari sumber-sumber tersebut agar memenuhi syarat sebagai air ketel dalam arti tidak akan merusak.

Proses fisik dilakukan dengan melewati air pengisi ketel melalui saringan-saringan untuk menyaring kotoran-kotoran yang dikandung air ketel tersebut. Kadang-kadang air ketel ini perlu ditekan agar bisa melalui ruangan yang kerapatannya tertentu, sesuai dengan kondisi air ketel yang akan disaring.

Pada penggunaan air sungai dan air danau seringkali diperlukan klorinasi (penyuntikan dengan gas  $\text{Cl}_2$ ) untuk membunuh binatang-binatang yang ada dalam air tersebut, agar terjadi pengumpulan binatang-binatang (bersarang) dalam instalasi pengolah air ketel. Dalam proses ini bisa terjadi gumpalan yang perlu diendapkan dengan bantuan bahan kimia tertentu. Setelah gumpalan mengendap, kemudian endapan dibuang secara mekanis, sehingga didapat air yang jernih.

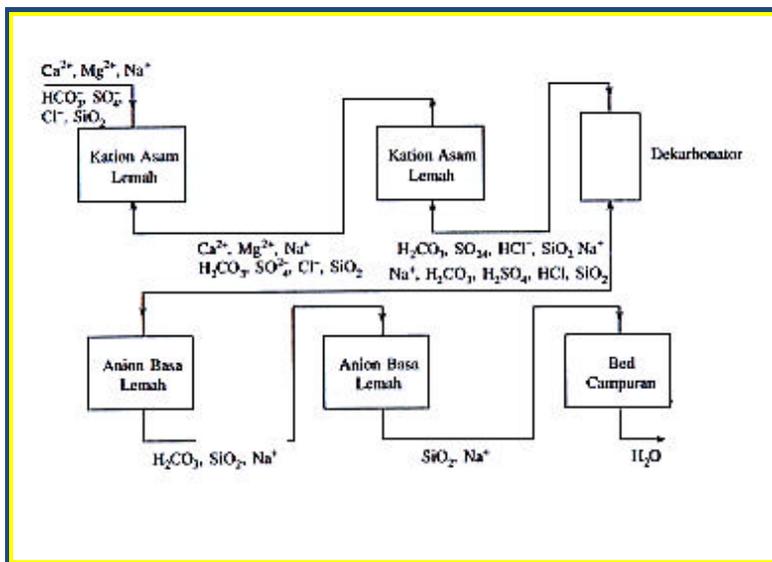
Air yang telah dijernihkan ini maupun air yang telah jernih yang berasal dari PAM, sumur, atau dari penyulingan air laut, kemudian perlu dilunakkan dengan proses kimia. Reaksi kimia ini menimbulkan berbagai endapan yang harus disaring oleh saringan (*filter*). Proses pemurnian pendahuluan, langkah berikutnya adalah langkah demineralisasi, yaitu suatu proses kimia untuk menghilangkan mineral-mineral yang masih terdapat dalam air ketel. Dalam proses demineralisasi ini dilakukan pengambilan mineral-mineral yang masih ada dalam air ketel melalui pertukaran ion. Untuk ini digunakan 2 macam resin yaitu resin kation dan

resin anion. Resin kation mempunyai ion positif hidrogen H<sup>+</sup> yang ditempelkan pada polimer yang bermuatan negatif Ion-ion hidrogen positif ini dimaksudkan untuk menangkap kation dari kalsium, magnesium dan natrium. Berbeda dengan resin kation, resin anion mempunyai ion negatif hidroksida yang ditempelkan pada polimer positif. Ion hidroksida negatif ini digunakan untuk menangkap ion-ion positif dari sulfat klorida dan karbonat.

*Cation* dan *anion* yang sudah kotos dengan ion-ion negatif dan ion-ion positif ini bisa dibersihkan (diregenerasi) dengan melakukan asam pada resin kation dan basa pada resin anion.

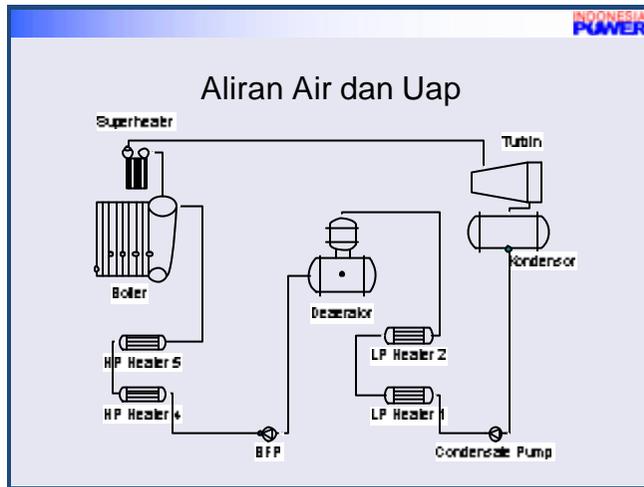
Kation yang telah banyak menangkap banyak ion-ion negatif dan kalsium, magnesium dan natrium sehingga terbentuk basa Ca(OH)<sub>2</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub> dan Na(OH). "Kotoran" berupa basa ini bisa dibersihkan dengan menggunakan larutan asam misalnya H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Anion yang "kotor" mengandung banyak asam H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, dan H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Untuk membersihkan "kotoran" ini bisa digunakan larutan basa misalnya NaOH. Mineral-mineral yang ada dalam air ketel secara bertahap dibersihkan.

Dekarbonator berfungsi mengeluarkan CO<sub>2</sub> yang larut dalam air ketel dengan cara meniupkan udara ke arah atas dalam aliran air yang mengalir ke bawah, sehingga gas CO<sub>2</sub> yang larut dalam air tertiuap keluar. Secara fisik proses ini berlangsung seperti Gambar III.28 berlangsung dalam tangki-tangki baja disertai dengan pompa-pompa penggerak air dan ditambahkan dengan saringan-saringan.

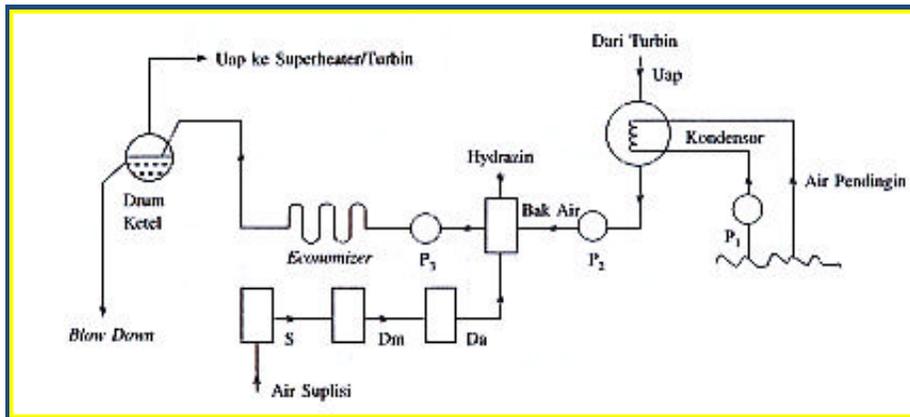


Gambar III.28  
Rangkaian proses demineralisasi

Air yang keluar dari instalasi demineralisasi masih mengandung gas-gas oksigen dan amoniak. Untuk mengeluarkan gas-gas ini, air ketel yang keluar dari instalasi demineralisasi dialirkan ke *deaerator*. Gambar III.29 menunjukkan rangkaian air ketel uap.



Gambar III.29  
Rangkaian air ketel uap



Gambar III.30  
Rangkaian Air Ketel Uap

Dalam *deaerator* air disemprotkan melalui *sprinkle* sehingga menjadi butir-butir kecil yang kemudian jatuh mengalir di atas pelat baja, terus ke bawah dan akhirnya keluar. Di sisi lain, uap panas dimasukkan dan mengalir ke atas, bertentangan dengan arah aliran-aliran air. Proses ini dimaksudkan memperluas dan menipiskan permukaan aliran air sehingga

menjadi seluas mungkin. Dengan proses ini gas oksigen yang ada dalam air ketel diharapkan keluar dan tertiuap keluar bersama uap panas. Keberadaan gas oksigen dalam air ketel sangat tidak diharapkan karena sifatnya yang korosif. Gas CO<sub>2</sub> di sebagian besar sudah keluar dalam *dekarbonizer*. Pembuangan gas *deaerator* berlangsung efektif pada nilai pH rendah mulai kira-kira 8,3 dan pada nilai pH = 4,3 pembuangan bisa 100%. Sedangkan untuk gas amonia (NH<sub>3</sub>) adalah mulai pH = 7,0 dan bisa 100% pada pH = 11,0.

Setelah keluar dari instalasi pengolah air ketel, sebelum masuk *economizer*, air ketel masih diberi zat kimia hidrazin untuk mencegah terjadinya korosi dengan dinding pipa ketel mengingat suhunya sesudah *economizer* bisa mencapai 200°C.

Dari uraian dalam sub bab ini, tampak bahwa pengolahan air ketel secara garis besar terdiri dari:

- a. Proses fisik/mekanis berupa penyaringan melalui saringan yang terjadi dalam saringan. Ada proses penyaringan yang menggunakan fenomena osmosa pada membran yang dikombinasi dengan tekanan.
- b. Proses reaksi kimia seperti yang diuraikan sedangkan proses kimia yang terjadi seperti diuraikan dalam pasal ini merupakan proses kimia elektro, yaitu pertukaran ion yang terjadi dalam instalasi demineralisasi.
- c. Proses pelepasan gas secara fisik, yang terjadi dalam *deaerator* kadang-kadang dipakai juga alat pelepas gas (*degasfier*) dalam bentuk yang berbeda.

Kualitas air ketel perlu dijaga secara kontinu karena kualitas air ketel yang tidak memenuhi syarat akan merusak peralatan PLTU yang dilaluinya baik ketika berbentuk cair (air) maupun ketika berbentuk uap.

## 10. Pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Perak

Pemeliharaan mempunyai maksud dan tujuan yaitu usaha untuk mempertahankan / mengembalikan kondisi unit/ peralatan agar tetap dalam kondisi prima, dalam arti siap dan handal setiap diperlukan. Operasi siklus dapat berjalan dengan baik jika pemeliharaan alat pada sistem berfungsi dalam membantu kerja siklus tersebut. Secara umum jenis pemeliharaan dibagi menjadi 4 yaitu:

### a. Pemeliharaan Rutin

Pemeliharaan ini dilakukan secara berulang dengan interval waktu maksimum 1 (satu) tahun, dan dapat dilaksanakan pada saat unit

beroperasi maupun tidak beroperasi. Pemeliharaan rutin berjalan (*on line maintenance*) dilakukan pada kondisi unit beroperasi dan pemeliharaan rutin pencegahan (*preventive maintenance*) dilakukan dengan rencana waktu yang telah ditetapkan, misalnya harian, mingguan atau bulanan dalam periode 1 (satu) tahun.

#### **b. Pemeliharaan Periodik**

Pemeliharaan periodik ialah pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan jam operasi (*Time Base Maintenance*), maupun berdasarkan monitor kondisi peralatan (*Condition Monitoring Base Maintenance*).

Pemeliharaan ini pada umumnya dilakukan dalam kondisi unit/peralatan tidak beroperasi, dengan sasaran untuk mengembalikan unit/peralatan pada *performance* atau unjuk kerja semula (*Commissioning*), atau setelah *overhaul* sebelumnya.

#### **c. Pemeliharaan Khusus**

Pemeliharaan yang direncanakan dan dilaksanakan secara khusus, dengan sasaran untuk memperbaiki/meningkatkan *performance* mesin/unit. Pemeliharaan khusus didasarkan atas pelaksanaan *inspection* sebelumnya, dan juga didasarkan atas pelaksanaan *Predictive Maintenance*. Pemeliharaan khusus dapat dilaksanakan pada saat pemeliharaan periodik maupun diluar pemeliharaan periodik.

#### **d. Pemeliharaan Prediktif (*Predictive Maintenance*)**

Ialah pemeliharaan yang didasarkan atas analisa dan evaluasi kondisi operasi mesin dengan sasaran mengoptimalkan ketersediaan mesin pembangkit dan biaya pemeliharaan. Pelaksanaan yang dilakukan dalam pemeliharaan prediktif antara lain:

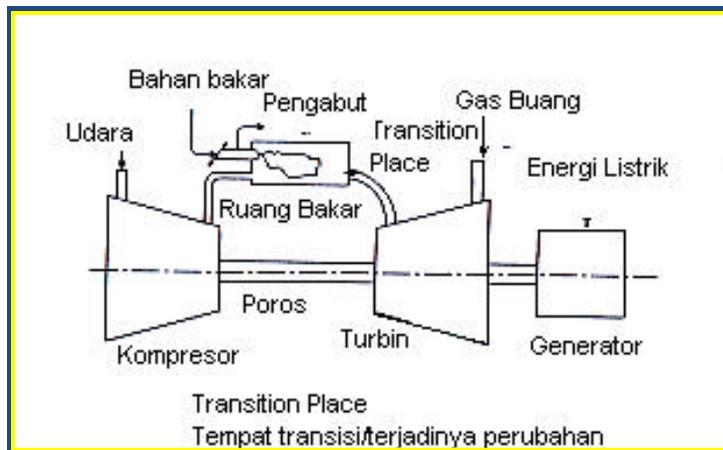
- Mengadakan pemeriksaan dan monitoring secara kontinyu terhadap peralatan pada saat operasi atau pada waktu dilaksanakan *inspection/ overhaul*.
- Mengadakan analisa kondisi peralatan atau komponen peralatan.
- Membuat estimasi sisa umur operasi peralatan sampai memerlukan perbaikan/ penggantian berikutnya.
- Mengevaluasi hasil analisa untuk menentukan *interval inspection*.

### **C. Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG)**

#### **1. Prinsip Kerja**

Gambar III.31 menunjukkan prinsip kerja PLTG. Udara masuk ke kompresor untuk dinaikkan tekanannya menjadi kira-kira 13 kg/cm<sup>2</sup>

kemudian udara tersebut dialirkan ke ruang bakar. Dalam ruang bakar, udara bertekanan  $13 \text{ kg/cm}^2$  ini dicampur dengan bahan bakar dan dibakar. Apabila digunakan bahan bakar gas (BBG), maka gas dapat langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tetapi apabila digunakan bahan bakar minyak (BBM), maka BBM ini harus dijadikan kabut terlebih dahulu kemudian baru dicampur dengan udara untuk dibakar. Teknik mencampur bahan bakar dengan udara dalam ruang bakar sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran.



Gambar III.31  
Prinsip Kerja Unit Pembangkit Turbin Gas

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

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

Selain masalah pendinginan, operasi turbin gas yang menggunakan gas hasil pembakaran dengan suhu sekitar  $1.300^{\circ}\text{C}$  memberi risiko korosi suhu tinggi, yaitu bereaksinya logam kalium, vanadium, dan natrium yang terkandung dalam bahan bakar dengan bagian-bagian turbin seperti sudu dan saluran gas panas (*hot gas path*).

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

## 2. Operasi dan Pemeliharaan

Dari segi operasi, unit PLTG tergolong unit yang masa *start*-nya pendek, yaitu antara 15-30 menit, dan kebanyakan dapat di-*start* tanpa pasokan daya dari luar (*black start*), yaitu menggunakan mesin diesel sebagai motor *start*.

Dari segi pemeliharaan, unit PLTG mempunyai selang waktu pemeliharaan (*time between overhaul*) yang pendek, yaitu sekitar 4.000-5.000 jam operasi. Makin sering unit mengalami *start-stop*, makin pendek selang waktu pemeliharaannya.

Walaupun jam operasi unit belum mencapai 4.000 jam, tetapi jika jumlah startnya telah mencapai 300 kali, maka unit PLTG tersebut harus mengalami pemeriksaan (inspeksi) dan pemeliharaan.

Saat dilakukan pemeriksaan, hal-hal yang perlu mendapat perhatian khusus adalah bagian-bagian yang terkena aliran gas hasil pembakaran yang suhunya mencapai  $1.300^{\circ}\text{C}$ , seperti: ruang bakar, saluran gas panas (*hot gas path*), dan sudu-sudu turbin. Bagian-bagian ini umumnya mengalami kerusakan (retak) sehingga perlu diperbaiki (dilas) atau diganti.

Proses *start-stop* akan mempercepat proses kerusakan (keretakan) ini, karena proses *start-stop* menyebabkan proses pemuatan dan pengerutan yang tidak kecil. Hal ini disebabkan sewaktu unit dingin, suhunya sama dengan suhu ruangan (sekitar  $30^{\circ}\text{C}$  sedangkan sewaktu operasi, akibat terkena gas hasil pembakaran dengan suhu sekitar  $1.300^{\circ}\text{C}$ .

Dengan memperhatikan buku petunjuk pabrik, ada unit PLTG yang boleh dibebani lebih tinggi 10% dari nilai nominalnya selama 2 jam, yang dalam bahasa Inggris disebut *peak operation*. Apabila dilakukan *peak operation*, maka hal ini harus diperhitungkan dengan pemendekan selang waktu antara inspeksi, karena *peak operation* menambah keausan yang terjadi pada turbin gas sebagai akibat kenaikan suhu operasi.

Dari segi masalah lingkungan, yang perlu diperhatikan adalah masalah kebisingan, yang sampai melampaui ketentuan yang dibolehkan. Seperti halnya pada PLTU, masalah instalasi bahan bakar, baik apabila digunakan BBM maupun apabila digunakan BBG, perlu mendapat perhatian khusus dari segi pengamanan terhadap bahaya kebakaran.

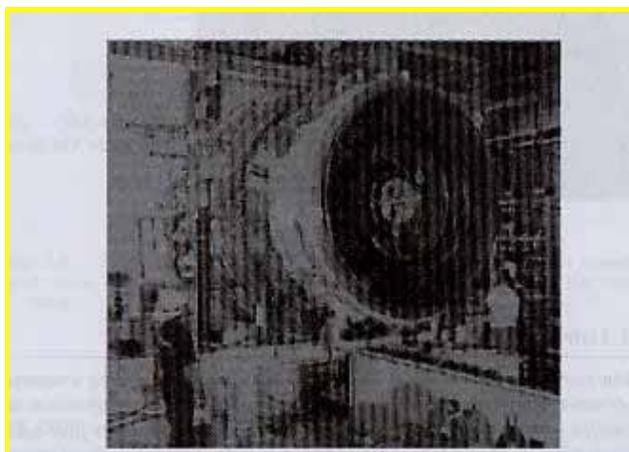
Dari segi efisiensi pemakaian bahan bakar, unit PLTG tergolong unit termal yang efisiensinya paling rendah, yaitu berkisar antara 15-25%. Dalam perkembangan penggunaan unit PLTG di PLN, akhir-akhir ini digunakan unit turbin gas *aero derivative*, yaitu turbin gas pesawat terbang yang dimodifikasi menjadi turbin gas penggerak generator.

Keuntungan dan pemakaian Unit *aero derivative*, yaitu didapat unit yang dimensinya lebih kecil dibanding unit *Stationer* daya yang sama. Di samping itu, harga unit bisa lebih murah karena intinya (turbin) sama dengan turbin pesawat terbang (misalnya, biaya pengembangan telah terserap oleh harga jual turbin gas pesawat terbangnya). bagaimana kinerjanya masih perlu pengamatan di lapangan.

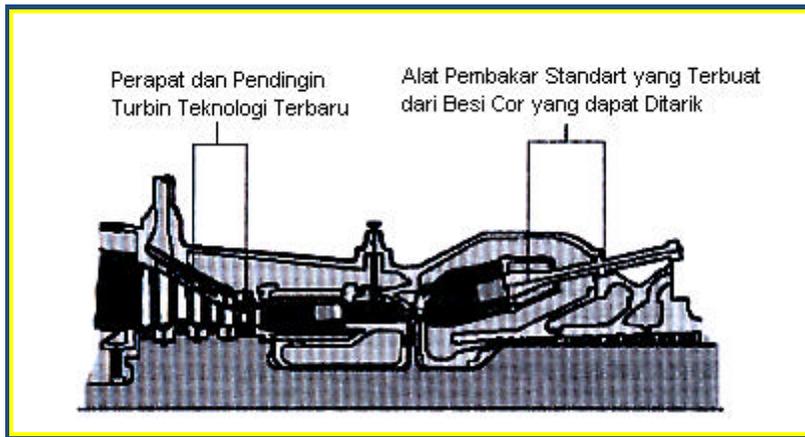
### 3. Pendinginan

Pendinginan sudu-sudu turbin dan poros turbin dilakukan dengan udara dari kompresor. Untuk keperluan ini, ada lubang pendingin dalam sudu-sudu dan dalam poros turbin yang pembuatannya memerlukan teknologi canggih.

Sedangkan pendinginan minyak pelumas dilakukan dengan menggunakan penukar panas (*heat exchanger*) konvensional.



Gambar III.32  
Produk-Produk Turbin Gas Buat Alstom dan Siemens



Gambar III.33

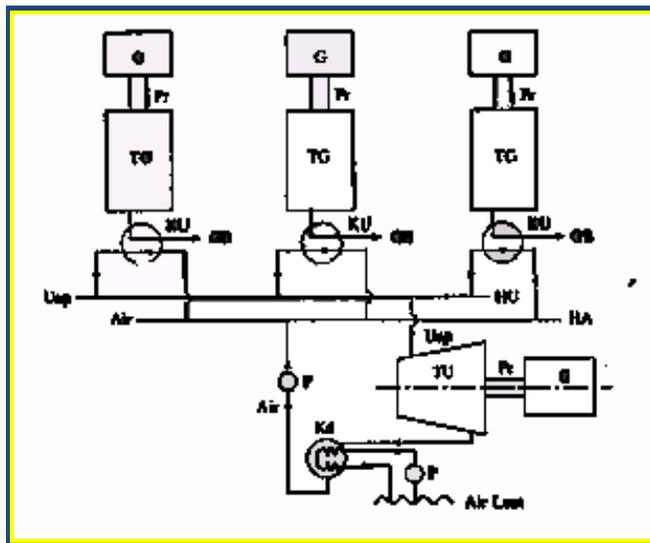
Konstruksi ruang bakar turbin gas buatan Alstom di mana kompresor di sebelah kanan sedangkan turbin di sebelah kiri

#### D. Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

PLTGU merupakan kombinasi PLTG dengan PLTU. Gas buang dari PLTG yang umumnya mempunyai suhu di atas  $400^{\circ}\text{C}$ , dimanfaatkan (dialirkan) ke dalam ketel uap PLTU untuk menghasilkan uap penggerak turbin uap. Dengan cara ini, umumnya didapat PLTU dengan daya sebesar 50% daya PLTG. Ketel uap yang digunakan untuk memanfaatkan gas buang PLTG mempunyai desain khusus untuk memanfaatkan gas buang di mana dalam bahasa Inggris disebut *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG).

Gambar III.34 menunjukkan bagan dari 3 buah unit PLTG dengan sebuah unit PLTU yang memanfaatkan gas buang dari 3 unit PLTG tersebut. 3 unit PLTG beserta 1 unit PLTU ini disebut sebagai 1 blok PLTGU. Setiap unit PLTG mempunyai sebuah ketel uap penampung gas buang yang keluar dari unit PLTG. Uap dari tiga ketel uap unit PLTG kemudian ditampung dalam sebuah pipa pengumpul uap bersama yang dalam bahasa Inggris disebut *common steam header*. Dari pipa pengumpul uap bersama, uap dialirkan ke turbin uap PLTU yang terdiri dari turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah. Keluar dari turbin tekanan rendah, uap dialirkan ke kondensor untuk diembunkan. Dari kondensor, air dipompa untuk dialirkan ke ketel uap.

HRSG dalam perkembangannya dapat terdiri dari 3 drum uap dengan tekanan uap yang berbeda: Tekanan Tinggi (HP), Tekanan Menengah (IP), dan Tekanan Rendah (LP). Hal ini didasarkan perhitungan Termodinamika Drum HP, IP, dan LP yang berhubungan dengan suhu gas buang yang tinggi, sedang, dan rendah (lihat Gambar III.35).



Gambar III.34

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

Keterangan: Header Uap; Pr : Poros; TG : Turbin Gas; KU : Ketel Uap; GB : Gas Buang;  
Kd : Kondensor; HA : Header Air; TU : Turbin Uap; Generator; P : Pompa

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

Karena daya yang dihasilkan turbin uap tergantung kepada banyaknya gas buang yang dihasilkan unit yaitu kira-kira menghasilkan 50% daya unit PLTG, maka dalam mengoperasikan PLTGU ini, pengaturan daya PLTGU dilakukan dengan mengatur daya unit PLTG, sedangkan unit PLTU mengikuti saja, menyesuaikan gan gas buang yang diterima dari unit PLTG-nya.

Perlu diingat bahwa selang waktu untuk pemeliharaan unit PLTG lebih pendek daripada unit PLTU sehingga koordinasi pemeliharaan yang baik

dalam suatu blok PLTGU agar daya keluar dari blok tidak terlalu banyak berubah sepanjang waktu

Ditinjau dari segi efisiensi pemakaian bahan bakar, PLTGU tergolong sebagai unit yang paling efisien dari unit-unit termal (bisa mencapai angka di atas 45%).

PLTGU termasuk produk teknologi mutakhir dalam perkembangan pusat listrik. PLTGU PLN yang pertama beroperasi di sekitar tahun 1995. Daya terpasangnya per blok dibatasi oleh besarnya daya terpasang unit PLTGU-nya. Sampai saat ini, unit PLTG yang terbesar baru mencapai daya terpasang sekitar 120 MW.

Pada Gambar III.37 tampak dua barisan cerobong. Barisan cerobong sebelah kiri berasal dari turbin gas, barisan cerobong sebelah kanan berasal dari ketel uap (HRSG).

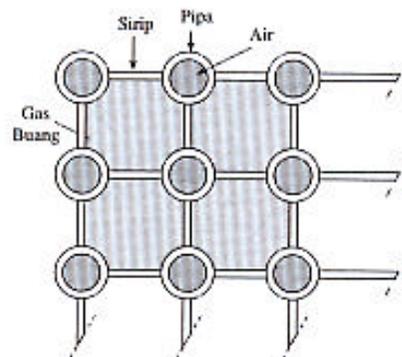
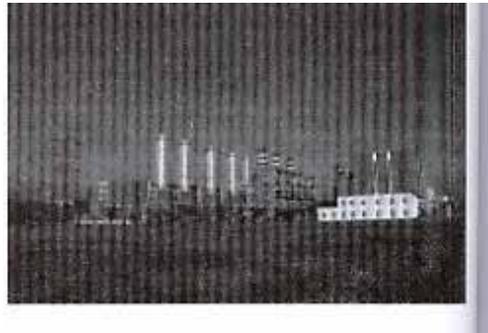
Proses perpindahan panas pada HRSG praktis hanya melalui proses konveksi dan konduksi saja, tidak ada proses radiasi, karena HRSG tidak berhadapan dengan lidah api. Oleh karenanya maka desain HRSG adalah dengan desain ketel. PLTU yang mengambil energi kalori langsung dari ruang bakar.

Gambar III.38, menggambarkan prinsip perpindahan panas yang terjadi melalui proses konveksi sentuhan HRSG. Seperti terlihat pada Gambar III.35, uap yang keluar dari drum tekanan menengah IP bertemu uap yang keluar dari turbin tekanan tinggi HP untuk selanjutnya dialirkan ke turbin tekanan menengah titik pertemuan ini perlu ada pengatur tekanan uap yang berfungsi menyamakan tekanan. Hal serupa berlaku antara uap dari drum LP yang bertemu dengan uap yang keluar dari turbin IP untuk selanjutnya menuju ke turbin LP.



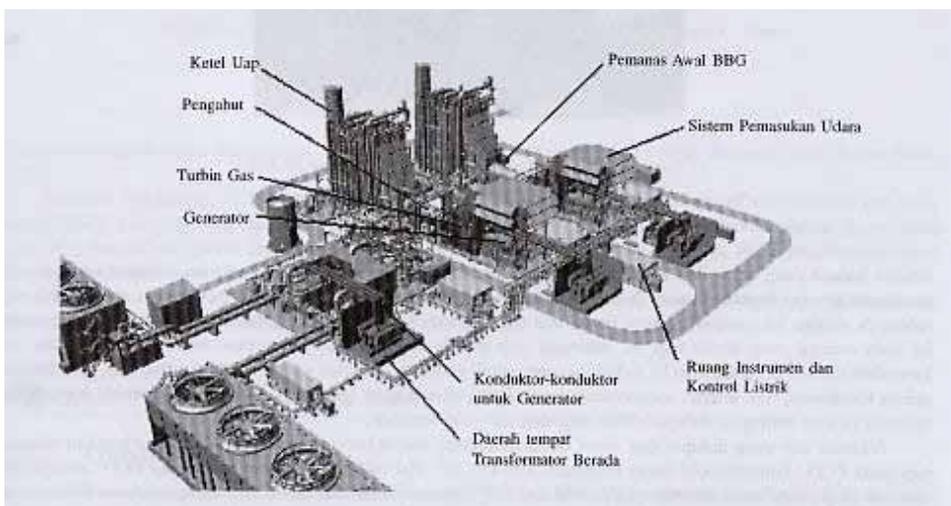
Gambar III.37

PLTGU Grati di Jawa Timur (Pasuruan) terdiri dari: Turbin Gas: 112,450 MW x 3; Turbin Uap: 189,500MW; Keluaran Blok: 526,850 MW



Gambar III.38

Bagian dari HRSG yang bersentuhan dengan gas buang



Gambar III.39

Blok PLTGU buatan Siemens yang terdiri dari dua buah PLTG dan sebuah PLTU

## E. Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Energi panas bumi (*Geothermal energi*) sudah dikenal sejak ratusan tahun lalu dalam wujud gunung berapi, aliran lava, sumber air panas maupun *geyser*.

Pada mulanya uap panas yang keluar dari bumi tersebut hanya dimanfaatkan untuk tujuan *theraphy*. Baru pada awal abad ke-20, seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dimakluminya keterbatasan sumber energi minyak maka, mulai dipikirkan pemanfaatan energi panas bumi untuk keperluan–keperluan yang lebih komersil.

Pada tahun 1913, pembangkit listrik tenaga panas bumi pertama, dengan kapasitas 250 KWH. Berhasil dioperasikan di Italia. Kemudian disusul dengan pembangkit lainnya yang sampai dengan tahun 1988 total kapasitas PLTP di dunia sudah mencapai lebih dari 20.000 MW.

Penelitian potensi panas bumi di Indonesia sudah di mulai sejak tahun 1926 di Kamojang Jawa Barat oleh Belanda dan diteruskan oleh bangsa Indonesia setelah kemerdekaan.

Dari penelitian yang dilakukan ternyata potensi panas bumi di Indonesia sangat memberi harapan, yaitu sekitar 16.000 MW. Namun demikian hingga 1992, baru sekitar 500 MW yang berhasil di usahakan sebagai energi listrik.

Kendala-kendala teknis dan non teknis masih perlu diatasi untuk mempercepat terwujudnya PLTP-PLTP yang lain.

Dalam rangka memberikan gambaran tentang PLTP, buku ini disusun dengan sangat ringkas namun demikian diharapkan cukup dapat memberikan penjelasan awal tentang dasar-dasar pusat listrik tenaga panas bumi.

### 1. Energi-energi bumi

#### a. Bentuk Struktur Bumi

Bumi diselimuti oleh *atmosphere* terdiri dari lapisan-lapisan yang disebut sebagai *Crust, Mantle, Liquid core, Inner core*.

Temperatur serta massa jenis meningkat semakin mendekati pusat bumi. Hanya lapisan terluar bumi yang sangat dikenal manusia, terdiri dari *Continental crust, Ocean Crust* serta lapisan es pada kutub bumi. Dalam

pengertian Geothermal energi hanya dipelajari tentang panas yang terdapat pada kerak bumi (*Crust*) dan bagian atas mantle.

### **b. Plate Tectonic**

*Crust* atau kerak bumi merupakan lempengan-lempengan yang terpisah dan diperkirakan terdiri dari 6 lempengan besar dan beberapa lempeng yang lebih kecil. Lempengan-lempengan tersebut bergerak dengan kecepatan rata-rata beberapa cm/tahun, lempengan yang bergerak menjauhi akan membentuk rongga saling mendekat akan berbenturan dan salah satu akan terdesak turun, pada daerah-daerah ini sering terjadi gempa dan disebut sebagai *Seismic belt* dan terdapat daerah-daerah gunung berapi, pada daerah-daerah tersebutlah daerah panas bumi terletak.

#### **1) Daerah Panas Bumi**

Pada kenyataannya tidak semua daerah Seismic belt merupakan daerah panas bumi (*Geothermal field*) yang potensial, hal ini disebabkan persyaratan geologi, hidrologi yang tak terpenuhi.

Persyaratan dasar yang harus dipenuhi untuk suatu daerah panas bumi yang potensi untuk di *explotasi* sebagai pembangkit listrik, adalah :

Daerah panas bumi berdasarkan gradient temperatur dipermukaan tanah diklasifikasikan menjadi 2 *group* yaitu :

- a) Non thermal area (*grad temp* 10-40°C Km *depth*)
- b) Thermal area yang terdiri :
  - μ *Semi thermal area* (70-80°C Km *of depth*)
  - μ *Hyperthermal area* (lebih besar dari semi thermal area)

Berdasarkan kemampuan daerah panas bumi memproduksi fluida kerja , daerah panas bumi diklasifikasi sebagai berikut:

- 1) *Semi thermal fields*, mampu memproduksi air panas dengan temperatur sampai dengan 100°C
- 2) *Wet fields*, memproduksi air panas yang berdekatan dengan temperatur diatas 100° C hingga bila tekanan diturunkan , uap dapat dipisahkan dengan air panas.
- 3) *Dry fields*, memproduksi uap jenuh, atau superheated tekanan di atas atmosphere.

## 2) Klasifikasi Sumber Energi Panas Bumi

### a) *Hot Water System*

Model dasar dari reservoir dengan temperatur air yang tinggi diperkirakan terletak pada daerah dataran rendah. Tanda panah menunjukkan arah aliran zat cair yang menuju permukaan tanah yang berasal dari resevoir.

Pengendapan mineral yang menjadi ciri utama terjadi tidak hanya disekitar reservoir tetapi juga dilapisan dekat permukaan tanah.

Seluruh perpindahan panas secara alami terjadi pada bagian atas reservoir.

Contoh

- *Imperial Vallery USA*
- *Cesano Prospect Italia*
- *Milos Yunani*

### b) *Two Phase System (heat water for Maountainous Terrain)*

Model dasar temperatur tinggi untuk *system dua phasa* ini di perkirakan terletak didaerah pegunungan dengan aliran air yang sangat besar (ditunjukkan pada gambar yang di arsir warna hitam) sumber panas adalah pluton dingin. Aliran air kepermukaan tanah ditandai dengan adanya pengendapan mineral pada permukaan tanah.

Sebagian besar dari perpindahan panas secara alami dari *pluton* melalui *reservoir* adalah timbulnya aliran air panas pada permukaan tanah.

Contoh.

- Lahendong
- Dieng
- Tongonan Piliphina
- Gunung Salak

### c) *Vapor Dominated System*

*Model dasar dari Vapor Dominated System* ini diperkirakan terletak pada daerah yang moderat. pada sistem ini dapat dilihat dengan adanya proses kondensasi (ditunjukkan pada daerah yang diarsir warna hitam) pada lapisan dari fluida diaphasa. Sedikit sekali air permukaan yang dipanasi. Hanya dalam reservoir uap panas dari bagian bawah reservoir bergerak ke permukaan.

Perpindahan panas dalam reservoir adalah dengan mengalirkannya kondensat dan uap menuju permukaan tanah akibat konduksi *Hot Rock* ke air resapan.

Contoh :

- Kamojang
- Darajad
- Ladarelo

#### **d) Volcanic Geothermal system**

Sistem ini agak sukar dipahami, hanya menurut ahli *geothermal* bernama *Henley* diperkirakan pada daerah gunung berapi ini terdapat gas dan oksidasi yang menghasilkan sulfat atau asam chorida seperti yang terjadi didaerah Sibayak dan Tangkuban Prahau.

## **2. Potensi Reservoir Panas Bumi**

### **a. Potensi Reservoir**

Yang dimaksud dengan resevoir adalah lapisan batuan permeable yang dapat menyimpan dan mengalirkan fluida. Kandungan panas dalam resevoir dihitung berdasarkan data-data Volume resevoir, temperatur, porositas, density, thermal capacity. Data-data tersebut diperoleh dari *survey geology, hydrology, geochemical, geophysic* dan pengeboran sumur-sumur *explorasi*.

### **b. Fild Run Down**

Pengambilan uap (fluida) yang terlalu berlebihan akan mempengaruhi tekanan dan temperatur resevoir, sehingga turbin tidak dapat mencapai kapasitas maksimumnya. Oleh karena perhitungan kapasitas resevoir berdasarkan parameter-parameter yang tidak diukur secara langsung maka hasil perhitungan tidak dapat dijadikan pegangan mutlak.

Untuk mengurangi resiko *field run down* biasanya PLPT dibangun secara bertahap sambil mengamati perubahan-perubahan pada resevoir.

## **3. Exploitasi Panas Bumi**

Yang dimaksud dengan exploitasi panas bumi adalah:

- Usaha mencari/menentukan daerah panas bumi
- Menentukan karakteristik dari daerah panas bumi (semithermal atau hyperthermal)
- Menentukan apakah daerah hyper thermal (bila di temukan, merupakan steam atau water dominated)
- Mempelajari lebih teliti, lokasi, luas, kedalaman dan temperatur daerah panas bumi.
- Mengetimasi potensi daya yang dapat diperoleh dari energi panas yang ada pada daerah panas bumi itu.

Pelaksanaan kegiatan explorasi memerlukan kerja sama dari beberapa disiplin ilmu antara lain *Geology, geochemistry, geophysics dan engineering*.

Dari data-data yang diperoleh tersebut diambil suatu keputusan pertimbangan sebagai berikut :

- a) Bagaimanakah kira-kira prospek panas bumi tersebut untuk explorasi selanjutnya.
- b) Bila prospeknya baik , apakah pengeborannya secara teknik bisa dilakukan.
- c) Bila dapat, berapa kira-kira kedalamannya
- d) Tentukan letak-letak sumur explorasi yang mula-mula akan dibor.

#### 4. Pengeboran

Peralatan dan teknologi untuk pengeboran sumur panas bumi berasal dari pengalaman untuk pengeboran minyak, yang kemudian disesuaikan dengan keadaan/kondisi panas bumi.

Perbedaan yang nyata antara kondisi pengeboran minyak terhadap panas bumi adalah, pada panas bumi:

- a) Batuan lebih keras
- b) Temperatur lebih tinggi
- c) Terdapat fluida yang korosif

##### a. Prinsip dasar pengeboran dan bagian-bagian utama

###### 1) *Cellars*

Sebelum pengeboran, dibuat bangunan beton dengan dimensi 10 ft x 8 ft x 10 ft yang disebut *Concrete cellars*, gunanya untuk menahan beban mesin pengeboran dan nantinya sebagai tempat kepala sumur serta katup-katupnya.

###### 2) *Optimum bore diameter*

Secara teoritis diameter lubang sumur merupakan fungsi dari tahanan aliran (*flow resistance*) pada lubang sumur itu sendiri, tahanan aliran di dalam formasi *permeable*, harga dari pipa, ratio kemungkinan keberhasilan sumur panas bumi.

###### 3) *Rotary drilling*

Mata bor (*bit*) diputar bersamaan dengan batang pemegangnya (*drillstem*) secara mekanis oleh mesin penggerak (*diesel*) dari permukaan tanah.

Pada menara pengeboran (derrick), terdapat *pulley* yang digunakan untuk mengatur posisi penempatan batang pemegang mata bor, juga untuk mencabut/menarik batang mata bor dan casing dari lubang sumur.

Peralatan-peralatan lain yang terdapat pada *drilling rig*, adalah pompa-pompa, kompresor, cooling tower untuk pendingin lumpur, penunjang/pemisah lumpur. Maksud penggunaan lumpur (*mud*) pada pengeboran panas bumi adalah:

- a) Pendingin dan pelumas mata bor dan batang pemegangnya.
- b) Mendorong serpihan-serpihan batuan (*cuttings*) keluar lubang sumur.
- c) Mencegah runtuhnya dinding sumur
- d) Mendinginkan bantuan sekitar lubang sumur.

#### 4) *Casing*

*Casing* merupakan dinding lubang sumur, terbuat dari bahan baja berkapasitas tinggi, dipasang sebelum memasuki daerah produksi.

Casing disemen pada lubang sumur sehingga kokoh dan sanggup menahan pipa-pipa dibawahnya.

Panjang *casing* tergantung pada kedalaman *production zone*. Bagian terbawah dari sumur panas bumi adalah *stalled liner* berbentuk pipa yang berlubang-lubang pada dinding yang berfungsi sebagai penyaring.

#### 5) *Directional drilling*

Pengeboran tidak dilakukan tegak lurus kebawah tapi dibelokkan kearah yang dikehendaki.

Keuntungan dari cara adalah :

- a) Beberapa kepala sumur terletak berdekatan sehingga luas permukaan tanah untuk kepala sumur lebih kecil.
- b) Untuk lokasi-lokasi reservoir yang sulit dijangkau.

Karakteristik sumur panas bumi dapat berlain-lain walaupun terletak pada satu daerah.

### **b. Pengukuran variabel**

Untuk memperoleh parameter-parameter tersebut di atas diperlukan pengukuran-pengukuran, tekanan dan temperatur dan dapat diukur dengan menggunakan *thermometer* dan *pressure gauge* untuk memperoleh harga *enthalpy*. Terdapat beberapa cara untuk mengukur *massa flow*, salah satu yang paling sederhana namun cukup akurat adalah *metode James* atau *Critical Lip pressure method* dimana

uap/campuran uap dan air di-*discharge* pada kecepatan suara (*sonic velocity*), tekanan pada ujung pipa merupakan ukuran dari energi panas (*heat flow*) per luas area penampang pipa

Rumus empiris “James” adalah

$$G = \frac{11.400p^{0.96}}{h^{1.102}} \quad (3-2)$$

Keterangan

$G$  = Flow dalam ft/s ft<sup>2</sup>

$p$  = *Critical lip pressure* dalam psia

$h$  = *Fluida enthalpy* dalam Btu/lb

### c. Kapasitas Daya dari Sumur Panas Bumi

Dengan mengetahui parameter-parameter tekanan, temperatur, kualitas, masa *flow* serta *enthalpy* pada kepala sumur, maka dapat dibuat sebuah kurva antara tekanan terhadap *output* (kW).

Berdasarkan kurva inilah *engineer* kemudian merencanakan mesin pembangkit dengan tekanan kerja, temperatur dan output optimum.

## 5. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dan Sistem Transmisi Uap

Masalah yang paling penting dan sangat mendasar dalam merencanakan pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah bagaimana mengubah secara efisien energi panas bumi dengan kandungan kalor yang rendah menjadi energi listrik.

Pada umumnya pembangkit listrik panas bumi berdasarkan jenis fluida kerja panas bumi yang diperoleh dibagi menjadi 2, yaitu:

- a) *Vapor dominated system (sistem dominasi Uap)*
- b) *Hot Water dominated system (Sistem Dominasi Air Panas)*

### a. *Vapor dominated system*

*Vapor dominated system* adalah jenis energi panas bumi yang menghasilkan uap kering sebagai fluida kerja. Jenis ini sangat jarang ditemukan, namun merupakan jenis yang sangat sesuai untuk dimanfaatkan pada pembangkit listrik.

Diperlukan *Steam Jet Ejector* dengan kemampuan yang relatif besar untuk mengatasi jumlah *nondensable* gas yang besar Contoh PLTP

*Vapor Dominan System* adalah di Geysir (USA), Lardaelo (Itali), Matsukawa (Japan) dan juga Kamojang.

### **b. *Water dominated system* (Sistim dominasi uap)**

Pada sistem ini fluida keluar dari sumur dengan tingkat kekeringan (*dryness*) yang sangat rendah, air lebih dominan atau berupa campuran dua phase (*two phase mixture*), dengan temperatur yang bervariasi dari 150° C , untuk sistem pengolahannya dikenal beberapa cara yaitu

#### **1) *Flushed steam system***

Pada sistem ini fluida pada kepala sumur merupakan campuran 2 phase cair dan gas, didalam *flash separator* tekanan diturunkan sehingga campuran 2 phasa memperoleh tingkat kekeringan yang lebih baik.

Kandungan air dipisahkan sedang uap digunakan untuk memutar turbin proses selanjutnya seperti pada sistem uap kering. Dibandingkan dengan *vapor dominated system*, *flash steam system* lebih sulit dalam beberapa hal:

- Jumlah massa yang perlukan lebih banyak.
- kedalaman sumur lebih dalam.
- kandungan mineral yang lebih banyak sehingga diperlukan desain khusus peralatan *valve-valve*, pompa-pompa desain khusus peralatan khusus peralatan *valve-valve*, pompa –pompa, separator dan lain-lain.
- korosi pada pipa-pipa, *casing* sumur dan lain-lain.

Ada 2 metode yang masih terus dikembangkan yaitu :

#### **a) *Double flash***

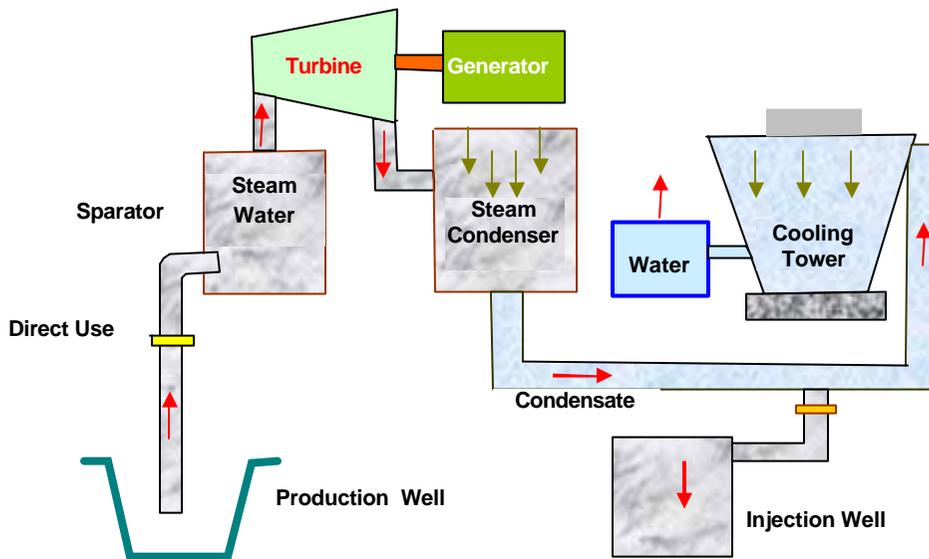
Air yang keluar dari separator pertama tidak langsung direinjeksikan kedalam tanah, tetapi dimasukkan ke separator kedua, dimana tekanan air tersebut diturunkan lagi, sehingga diperoleh tingkat kekeringan uap yang lebih baik untuk memutar turbin tekanan rendah, sedangkan air dari sparator II direinjeksikan ke dalam tanah.

#### **b) Turbin**

Tekanan air setelah keluar dari separator I masih Cukup tinggi, digunakan untuk memutar turbin air yang didesign khusu dan generator tambahan yang beroperasi paralel dengan generator dari turbin uap.

Air yang keluar dari separator masih mengandung energi yang cukup besar untuk menggerakkan turbin sehingga sistem ini dikembangkan

terus. Gambar III.40 menunjukkan Skematik Diagram PLTP *Flused Steam System*



Gambar III.40  
Skematik Diagram PLTP *Flused Steam Sistem*

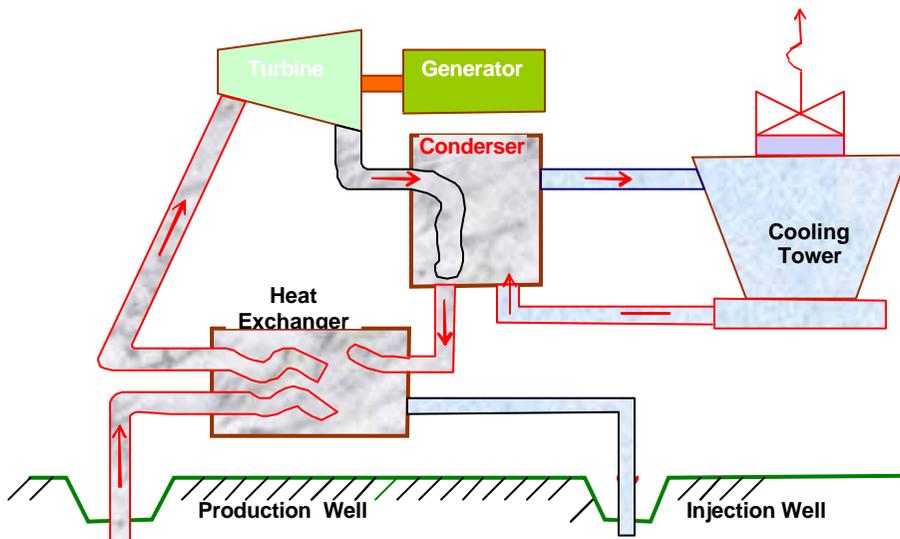
## 2) *Binary cycle system (sistem Siklus Biner)*

Kira-kira 50% dari air hydrothermal yang ada, bersuhu antara 150° C sampai dengan 205°C.

Apabila digunakan pada *Flashed steam system*, tekanan air diturunkan untuk mendapatkan tingkat kekeringan uap yang lebih baik, sehingga diperlukan jumlah aliran air yang lebih banyak.

Untuk peningkatan efisiensi, air dari dalam tanah digunakan sebagai sumber panas pada siklus tertutup untuk memanaskan fluida kerja yang mempunyai titik didih rendah seperti *Isobutane (2-Methyl propane)*  $C_4H_{10}$  (titik didih normal pada tekanan 1 Atm = -10°C, Freon -12 (memiliki titik didih normal -12,6°C -29,8°C), *Amonia Propane*.

Gambar III.41 memperlihatkan *schematic diagram binary system*. Fluida panas bumi (air) dari dalam tanah dialirkan ke *Heat exchanger* (penukar kalor) untuk memanaskan fluida organik (1) dan dipompakan kembali kedalam tanah (*Reinjection*) didalam penukar kalor terjadi pertukaran kalor antara fluida panas bumi dengan fluida organik, sehingga diperoleh uap *Superheated* untuk menggerakkan turbin dengan rankin tertutup dan selanjutnya dikondensasikan didalam *Surface condenser* dan kondensat dipompakan kembali ke heat exchanger kondensator didinginkan oleh air reinjeksikan ke dalam tanah bersama-sama dengan fluida panas bumi yang keluar dari *Heat exchanger*.



Gambar III. 41  
PLTP Siklus Binary

## F. Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

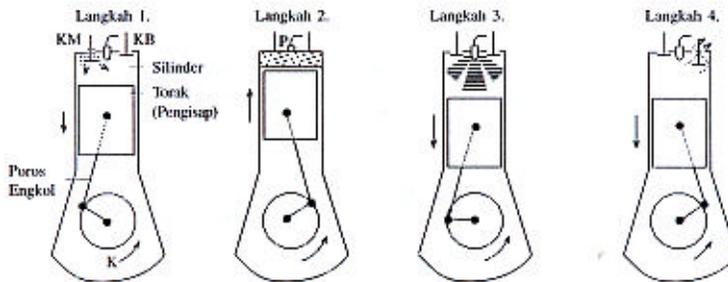
### 1. Prinsip Kerja

PLTD mempunyai ukuran mulai dari 40 kW sampai puluhan MW. Untuk menyalakan listrik di daerah baru umumnya digunakan PLTD oleh PLN. Di lain pihak, jika perkembangan pemakaian tenaga listrik telah melebihi 100 MW, penyediaan tenaga listrik yang menggunakan PLTD tidak ekonomis lagi sehingga harus dibangun Pusat Listrik lain, seperti PLTU atau PLTA. Untuk melayani beban PLTD dengan kapasitas di atas 100

MW akan tidak ekonomis karena unitnya menjadi banyak, mengingat Unit PLTD yang terbesar di pasaran sekitar 12,5 MW.

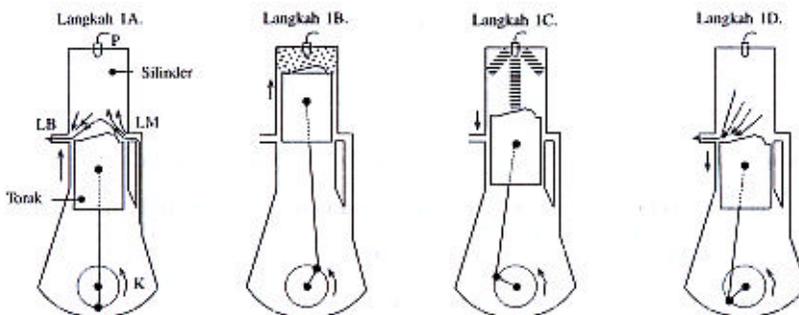
Gambar III.42 menggambarkan prinsip kerja mesin diesel 4-langkah, dan Gambar III.43 prinsip kerja mesin diesel 2-langkah. Secara teoretis, mesin diesel 2-langkah dengan dimensi dan jumlah putaran per detik yang sama dibandingkan dengan mesin diesel 4-langkah, dapat menghasilkan daya 2 kali lebih besar. Hal ini disebabkan karena pada mesin diesel 2-langkah terdapat 1 kali langkah tenaga untuk setiap 2 langkah atau setiap 1 putaran, sedangkan pada mesin diesel 4-langkah, langkah tenaga terjadi langkah setiap 4 langkah atau setiap 2 putaran. Namun dalam praktik, angka 2 kali lebih besar untuk daya yang di dapat pada mesin diesel 2 Langkah tidak tercapai (hanya sekitar 1,8 kali). Hal ini disebabkan karena proses pembilasan ruang bakar silinder mesin diesel 2-langkah tidak sebersih pada mesin diesel 4-langkah sehingga proses pembakarannya tidak sesempurna seperti pada mesin diesel 4-langkah. Karena proses pembakaran ini, maka efisiensi mesin diesel 2 langkah tidak bisa sebaik efisiensi mesin diesel 4-langkah. Pemakaian bahan bakarnya lebih boros.

Mesin diesel 2-langkah lebih cocok digunakan pada keperluan yang memerlukan penghematan ruangan, seperti pada lokomotif kereta api atau pada kapal laut. Mesin ini disebut sebagai mesin diesel 2-langkah karena dalam setiap langkahnya terjadi satu kali langkah bertenaga dengan dorongan gas hasil ledakan/pembakaran.



Gambar III.42 Prinsip kerja Mesin Diesel 4 Langkah.

KM: Katup Masuk, KB: Katup Buang, P: Pengabut Bahan Bakar, K: Karter berisi minyak pelumas dan udara.



Gambar III.43. Prinsip kerja Mesin Diesel 2 Langkah.

LM : Lubang Masuk; LB : Lubang Buang; P : Pengabut Bahan Bakar;  
K :Karter (berisi minyak pelumas dan udara)

## 2. Pengaruh Jumlah Putaran

Untuk keperluan pembangkitan tenaga listrik, umumnya digunakan mesin diesel 4-langkah karena masalah ruangan tidak menjadi soal dan yang lebih penting ialah pemakaian bahan bakarnya lebih hemat. Karena frekuensi yang harus dihasilkan generator harus konstan 50 Hertz atau 60 Hertz, maka putaran mesin diesel harus konstan. Di pasaran, terdapat unit pembangkit diesel dengan putaran (untuk frekuensi 50 Hertz) dari 300 putaran per menit sampai dengan 1.500 putaran per menit (rpm). Untuk daya yang sama makin tinggi nilai rpmnya, makin kecil dimensi unit pembangkitnya dan harganya per kW terpasang juga lebih murah. Tetapi karena banyaknya bagian yang bergerak pada mesin diesel, makin tinggi nilai rpm mesin diesel, makin sering mesin diesel tersebut mengalami gangguan. Oleh karena itu, untuk unit pembangkit diesel yang harus beroperasi kontinu, lebih baik digunakan pembangkit yang mempunyai nilai rpm rendah. Sedangkan untuk unit pembangkit cadangan, dapat digunakan unit dengan nilai rpm yang tinggi.

Dengan memperhatikan buku petunjuk pabrik, mesin-mesin diesel yang mempunyai nilai rpm rendah, sampai dengan 500 rpm, dapat

menggunakan bahan bakar minyak (1313 M) dengan kualitas No. 2 dan No. 3 yang harganya relatif lebih murah daripada bahan BBM kualitas No. 1. BBM untuk mesin diesel yang tersedia di Indonesia disediakan oleh PERTAMINA, yaitu:

Kualitas No. 1 *High Speed Diesel Oil*, biasa disingkat HSD

Kualitas No. 2 *Intermediate Diesel Oil*, biasa disingkat IDO

Kualitas No. 3 *Marine Fuel Oil*, biasa disingkat MFO

Mesin diesel dengan nilai rpm di atas 500 rpm, harus menggunakan HSD. Mesin diesel dengan rpm rendah, sampai dengan 500 rpm, memakai UFO di mana harus dipanaskan terlebih dahulu agar tercapai viskositas yang cukup rendah. Apabila menggunakan IDO, maka tidak diperlukan pemanasan terlebih dahulu.

Gas dapat juga digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel, tetapi mesin diesel seperti ini harus didesain khusus. Ada juga mesin diesel yang didesain untuk dapat menggunakan bahan bakar minyak maupun gas. Umumnya apabila digunakan gas (BBG), maka daya keluar dari mesin diesel lebih rendah dibanding dengan apabila menggunakan BBM (kira-kira 80%).

Daya keluaran dari poros mesin Diesel 4-langkah dinyatakan oleh peresamaan berikut ini:

$$P = S \cdot A \cdot I \cdot \text{BMEP} \times \frac{n}{2 \text{ atau } 1} \times k \quad [\text{Daya Kuda}] \quad (3-3)$$

di mana:

P = Daya yang keluar dari poros mesin Diesel [Daya Kuda]

S = Jumlah silinder

A = Luas permukaan torak [cm<sup>2</sup>]

I = Langkah torak [meter]

BMEP = *Brake Mean Effective Pressure* = Tekanan rata-rata [kg/cm<sup>2</sup>]

n = Jumlah putaran poros per detik [ppd]

2 = Pembagi n untuk mesin Diesel 4-langkah

1 = Pembagi n untuk mesin Diesel 2-langkah

K = Konstanta

satuan = inchi, mengingat bahwa 1 Daya Kuda = 75 kgm/detik

Dengan memperhitungkan efisiensi generator yang diputar oleh mesin diesel dan mengingat bahwa 1 Daya Kuda = 736 Watt, maka apabila daya keluar mesin diesel diketahui, selanjutnya dapat dihitung daya keluar dari generator yang diputar mesin diesel.

Dalam pembangkitan tenaga listrik yang menggunakan mesin diesel, putaran mesin diesel harus konstan agar frekuensi yang didapat dari generator selalu konstan 50 Hz atau 60 Hz sehingga untuk pengaturan daya keluar dari generator, yang dapat diatur hanya nilai BMEP. Pengaturan nilai BMEP ini dilakukan dengan mengatur pemberian bahan bakar yang harus diikuti oleh pengaturan pemberian udara. Hal ini disebabkan bahan bakar memerlukan udara untuk pembakaran.

Terlalu banyak udara atau terlalu sedikit udara untuk pembakaran menyebabkan pembakaran bahan bakar dalam silinder mesin diesel menjadi tidak efisien. Masalahnya, dalam mesin diesel yang putarannya konstan, perubahan pemberian bahan bakar tidak dapat diikuti oleh perubahan pemberian udara pembakaran secara seimbang sehingga nilai efisiensi maupun nilai BMEP tidak konstan sebagai fungsi beban. Oleh karena itu, unit pembangkit diesel sebaiknya dioperasikan dengan beban konstan yang menghasilkan efisiensi maksimum, yaitu pada kira-kira beban 80%.

Dalam perkembangan mesin diesel, pembuat (pabrik) berusaha membuat mesin diesel dengan daya sebesar mungkin tetapi dimensinya sekecil mungkin sehingga dicapai ongkos pembuatan yang serendah mungkin, agar dapat bersaing dalam pasar. Untuk melaksanakan hal ini, para pembuat mesin diesel berusaha menaikkan nilai BMEP dan nilai  $n$ . Usaha lainnya adalah menambah jumlah silinder.

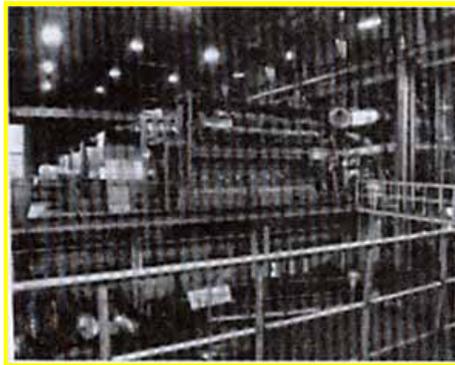
Dalam praktek mesin diesel paling banyak mempunyai 16 buah silinder.

### 3. Operasi dan Pemeliharaan

Umumnya semua unit pembangkit diesel dapat di-*start* tanpa memerlukan sumber tenaga listrik dari luar (dapat melakukan *black start*). Men-*start* mesin diesel dengan daya di bawah 50 kW dapat dilakukan dengan tangan melalui engkol. Untuk daya di atas 50 kW sampai kira-kira 100 kW, umumnya distart dengan menggunakan baterai aki. Sedangkan untuk mesin diesel dengan daya di atas 100 kW, umumnya digunakan udara tekan.

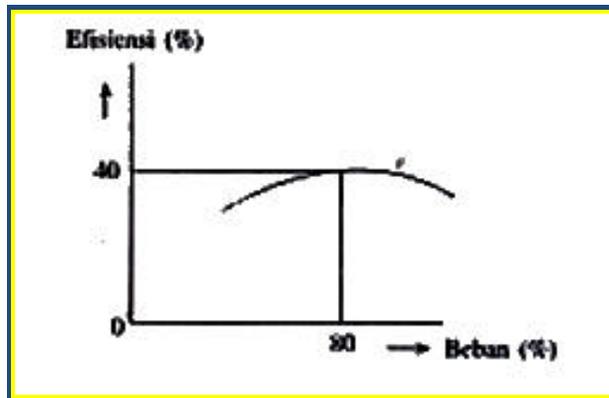
Dari segi pemeliharaan dan perbaikan, unit pembangkit diesel tergolong unit yang banyak menimbulkan masalah, khususnya yang menyangkut mesin dieselnnya. Hal ini disebabkan karena banyaknya bagian-bagian yang bergerak dan bergesek satu sama lain sehingga menjadi aus dan memerlukan penggantian secara periodik. Untuk itu, diperlukan manajemen pemeliharaan beserta penyediaan suku cadang yang teratur dan dicampur dengan bahan bakar yang telah dikabulkan oleh pengabut. Campuran ini kemudian meledak pada akhir langkah kompresi dan menghasilkan daya dorong torak pada langkah tenaga.

Penggunaan *turbocharger* bersama *intercooler* dimaksudkan untuk mendapatkan berat udara yang sebesar mungkin untuk volume silinder tertentu, sehingga bisa membakar (meledakkan) bahan bakar sebanyak mungkin sehingga didapat gas hasil pembakaran dengan tekanan yang setinggi mungkin, yang berarti dicapai nilai BMEP yang setinggi mungkin. Tekanan gas hasil pembakaran yang mendorong torak (piston) tidak konstan besarnya, nilai maksimum terjadi sewaktu torak ada pada posisi paling atas (titik mati atas), kemudian menurun dengan menurunnya torak dalam silinder, menurut hukum ekspansi adiabatik. Nilai rata-rata dari tekanan gas pembakaran ini yang diukur pada poros mesin diesel melalui sistem rem (*brake*) disebut *brake mean effective pressure* (BMEP) dari mesin diesel tersebut.

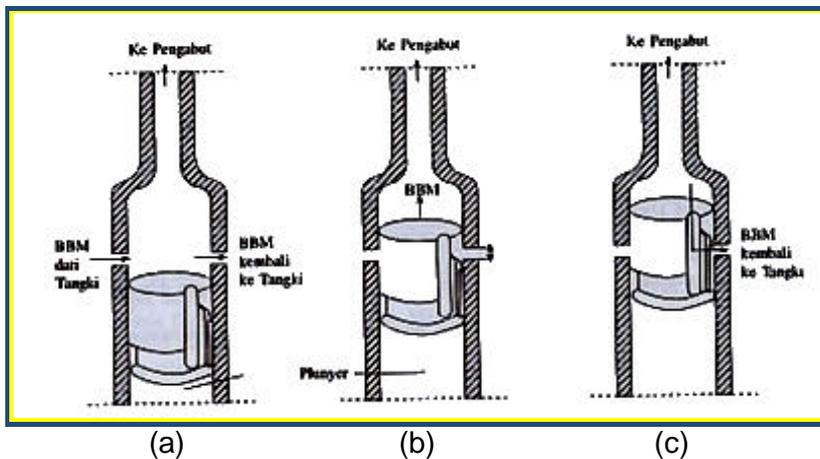


Gambar III. 44

PLTD Sungai Raya Pontianak (Kalimantan Barat 4x8 MW di mana pondasi mesin berada di atas permukaan tanah dan jumlah silinder 16 dalam susunan V



Gambar III.45  
Kurva Efisiensi Unit Pembangkit Diesel



Gambar III.46  
Pompa pengatur injeksi BBM  
(a) Posisi 1, (b) Posisi 2, (c) Posisi 3

Prinsip kerja pompa pengatur injeksi BBM yang ditunjukkan pada Gambar III.46 dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada posisi 1 plunyer belum menekan BBM. Posisi 2 plunyer menekan BBM ke pengabut karena lubang ke tangki telah ditutup oleh dinding plunyer. Posisi 3, plunyer berhenti menekan dinding BBM (gembos). BBM dapat menyelip kembali ke tangki melalui alun tegak pada plunyer terus ke lubang yang sekarang telah terbuka akibat adanya alur miring pada dinding plunyer.

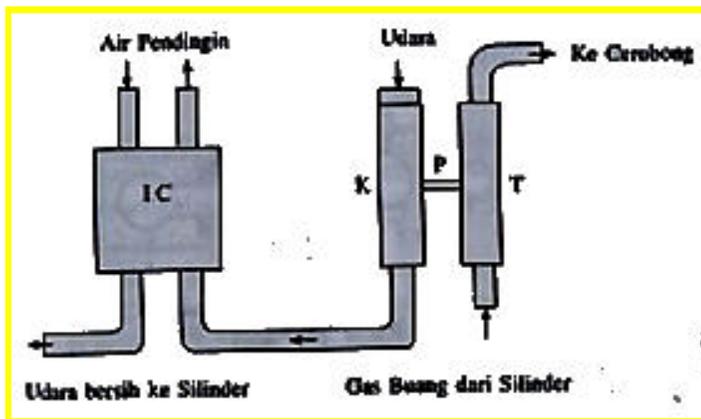
Plunyer bergerak dalam arah ke atas dan ke bawah. Pengaturan banyaknya BBM yang dipompakan ke arah pengabut diatur dengan mengatur besarnya langkah efektif dari plunyer yaitu: besarnya diatur dengan memutar plunyer pada sumbunya. Kalau dilihat dari atas:

Plunyer diputar ↻ : nilai  $p$  naik, BBM bertambah, daya mesin diesel naik

Plunyer diputar ↻ : nilai  $p$  turun, BBM berkurang, daya mesin diesel turun

Gerak ↑↓ dilakukan oleh bubungan (*cam*)

Gerak ↻ diatur oleh *fuel rack* yang digerakkan oleh governor

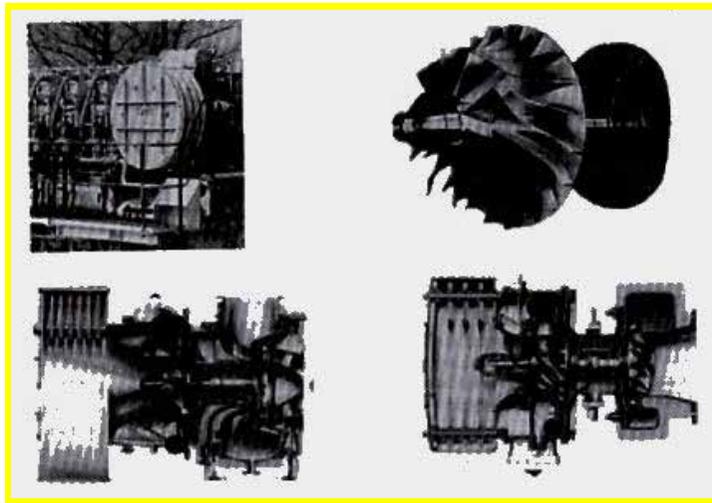


Gambar III.47  
Turbocharger Bersama Intercooler

Keterangan

S = Saringan Udara; K = Kompresor; T = Turbin Gas;

LC = Intercooler; P = Poros



(b)

(b)

Gambar III.48

Gambar potongan dan *rotor turbocharger* buatan MAN

(a) Kompresor (b) Turbin gas

Pada unit PLTD, karena frekuensi yang dihasilkan generator nilainya harus konstan, maka putarannya juga harus konstan. Pengaturan daya hanya bisa dilakukan dengan mengatur banyaknya bahan bakar yang disemprotkan ke dalam oleh pompa plunyer (Gambar III.46). Jika dalam pengaturan daya ini dilakukan penambahan bahan bakar dengan cara menarik *fuel rack* tekanan sehingga langkah efektif dari pompa plunyer bertambah, maka dengan bertambahnya bahan bakar yang disemprotkan ke dalam silinder tekanan gas hasil pembakaran naik dan daya yang dihasilkan mesin diesel naik. Kenaikan tekanan gas pembakaran ini akan diikuti dengan kenaikan tekanan gas buang yang selanjutnya menyebabkan *turbocharger* yang digerakkan oleh gas buang akan naik kecepatan putarannya sehingga tekanan udara (jadi juga berat udara) yang dihasilkan turbocharger juga akan naik. Hal ini diperlukan untuk mengimbangi penambahan bahan bakar yang dibakar (diledakkan) dalam silinder.

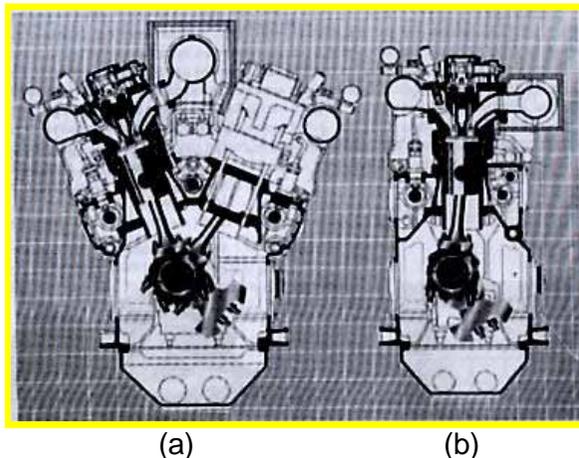
Perubahan jumlah bahan bakar yang disemprotkan ke dalam silinder yang kemudian diikuti dengan perubahan tekanan (berat) udara pembakaran yang dihasilkan, oleh turbocharger, tidak berlangsung proporsional. Hal ini menyebabkan karakteristik efisiensi terhadap beban unit pembangkit nilainya tidak konstan seperti ditunjukkan oleh Gambar III.45. Efisiensi unit pembangkit tergantung kepada efisiensi pembakaran yang terjadi dalam silinder. Sedangkan proses pembakaran dalam silinder akan paling efisien jika perbandingan berat bahan bakar dan berat udara mencapai angka tertentu sehingga seluruh bahan bakar

terbakar (meledak) habis dengan tepat, tidak terjadi kekurangan atau kelebihan udara. Kondisi ini tercapai pada titik efisiensi maksimum.

Perkembangan lain dalam rangka menaikkan kemampuan mesin diesel tanpa mengubah dimensinya adalah dengan menaikkan jumlah putarannya per menit (rpm). Saat ini untuk frekuensi 50 Hertz sudah ada unit PLTD dengan jumlah putaran 1500 rpm. Makin tinggi nilai rpm-nya makin pendek umur ekonomis unit PLTD. Unit PLTD dengan jumlah putaran 1500 rpm sebaiknya tidak dioperasikan kontinu, melainkan sebagai unit cadangan atau unit beban puncak. Unit PLTD dengan nilai rpm yang tinggi membutuhkan teknologi yang tinggi bagi bantalan-bantalannya dan bagi cincin toraknya (*piston ring*).

Memperbesar kemampuan mesin diesel dengan cara memperbesar dimensinya dilakukan dengan memperbesar diameter silinder serta, memperbanyak jumlah silinder yang disusun dalam susunan V. Susunan V ini bisa mencapai 16 silinder. Mesin diesel bisa juga menggunakan bahan bakar gas. Apabila digunakan bahan bakar gas pengabut dan pompa bahan bakarnya perlu diganti.

Pada umumnya apabila dipakai gas alam, daya yang dihasilkan mesin diesel turun dibandingkan apabila memakai BBM, bisa sampai menjadi 80% tergantung nilai kalori dari gas yang dipakai. Mesin diesel bisa pula didesain untuk menggunakan BBM dan gas (*dual fuel*).



Gambar III.49

Mesin Diesel buatan MAN dan B & W

(a) dengan susunan silinder V, (b) dengan susunan silinder baris

## G. Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

PLTN pada dasarnya sama dengan PLTU hanya saja ruang bakar PLTU diganti dengan reaktor nuklir yang menghasilkan panas (kalor). Dalam reaktor nuklir, terjadi proses fission (fisi), di mana bahan bakar nuklir uranium U-235 mengalami fission menjadi unsur-unsur lain. Pada proses fission ini, timbul panas yang digunakan untuk menghasilkan uap (lihat Gambar III.50).

Proses fission adalah proses di mana suatu unsur diuraikan menjadi unsur-unsur lain yang jumlah massanya lebih kecil daripada massa uranium-235 yang diuraikan. Selisih massa ini (ada massa yang hilang) adalah massa yang berubah menjadi energi panas (kalor) dalam reaktor nuklir (sesuai dengan rumus  $E = MC^2$ ). Inti uranium-235 ditembak dengan neutron sehingga pecah menjadi inti xenon dan inti strontium, selain itu terjadi pula pelepasan neutron dari inti uranium-235 yang ditembak tersebut.

Ada 2 macam reaktor nuklir:

### 1. Reaktor *Thermal Fission*

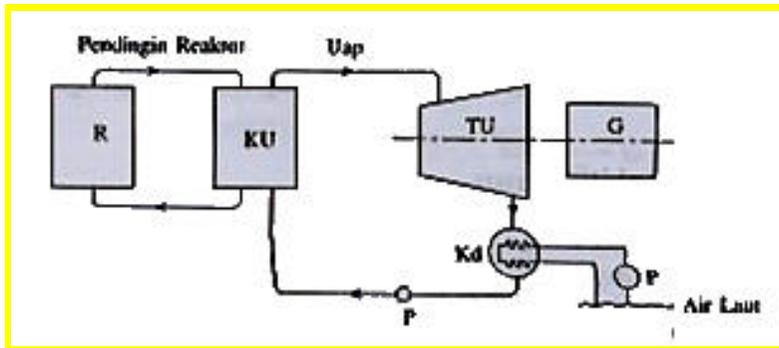
Dalam reaktor ini, neutron bebas yang terjadi karena proses fission, sebagian besar energinya diubah menjadi panas oleh moderator yang berfungsi mengurangi kecepatan neutron yang memancar. Moderator bisa juga berfungsi sebagai pendingin.

### 2. Reaktor *Fast Breeder*

Dalam reaktor ini, neutron yang memancar tidak dihambat/ dikurangi kecepatannya sehingga tidak banyak energi neutron yang diubah menjadi panas. Tetapi neutron-neutron ini kemudian menghasilkan plutonium (Pu)-239 dan uranium (U)-238. Dalam praktik, uranium alami terdiri dari 99,3% U-238. Plutonium yang didapat bisa digunakan sebagai bahan fission. Ditinjau dari teknik memindahkan kalori yang dihasilkan reaktor nuklir ke sirkuit uap PLTU, ada 4 macam PLTN:

- a. PUN dengan Air Bertekanan (*Pressurized Water Reactor/ PWR*). Di sini, perpindahan kalori dilakukan dengan menggunakan air yang bertekanan (Gambar III.50).
- b. PLTN dengan Air Mendidih (*Boiling Water Reactor / BWR*). Di sini, perpindahan kalori dilakukan dengan menggunakan air mendidih yang bercampur uap (Gambar III.52).
- c. PLTN dengan Pendinginan Gas (*Gas Cooled Reactor/ GCR*). Seperti pada PUN dengan air bertekanan, namun air diganti dengan gas.

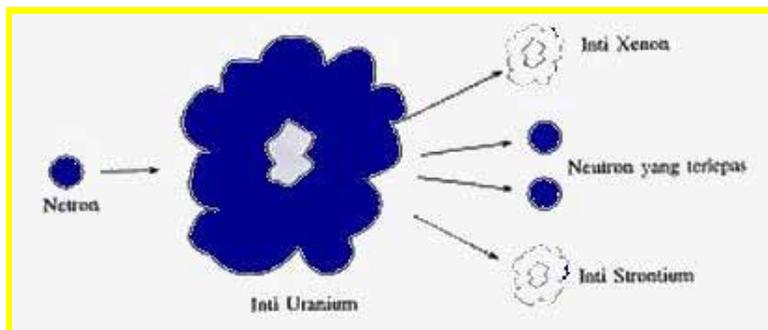
- d. PUN dengan Air Berat (*Pressurized Heavy Water Reactor / PHWR*). Seperti pada PUN dengan air bertekanan, namun air diganti dengan air berat D<sub>2</sub>O (Deutorium Oksigen).



Gambar III. 50

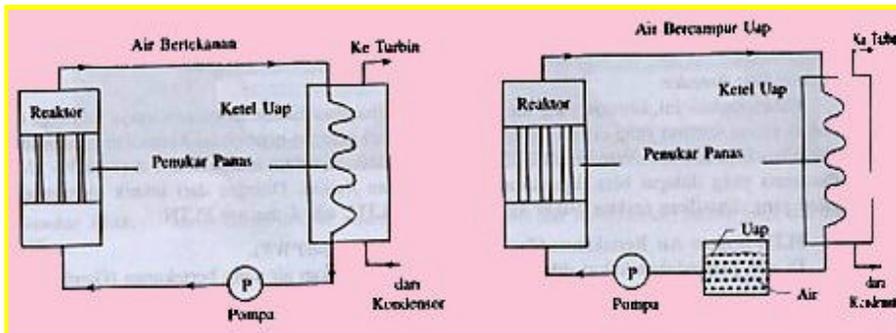
Skema prinsip kerja PLTN

KU: Ketel Uap, TU: Turbin Uap, Kd: Kondensator, P: Pompa, R: Reaktor Nuklir



Gambar III. 51

Proses Emulsion pada Reaktor Nuklir



Gambar III. 52

Reaktor dengan Air Bertekanan dan Mendidih

Dalam operasi PLTN, bebannya sebaiknya konstan, karena perubahan beban PLTN memerlukan perubahan proses fission yang tidak mudah dilakukan.

Dari segi lingkungan, perlu perhatian khusus terhadap kebocoran reaktor nuklir yang pancaran sinar radio aktif yang membahayakan keselamatan manusia. Selain itu, perlu pemikiran tempat pembuangan limbah nuklir. Karena adanya bahaya terhadap lingkungan seperti tersebut di dalam perkembangannya banyak tuntutan di negara maju yang menghendaki agar PLTN ditutup.

## H. Unit Pembangkit Khusus

Ada beberapa macam pemakai tenaga listrik yang sangat tergantung/memerlukan pasokan daya yang kontinu/andal. Suatu interupsi pasokan daya akan merusak proses produksi, seperti halnya pada pengecoran baja, proses kimia, atau pemintalan. Demikian pula halnya untuk gedung-gedung tertentu yang sering digunakan peristiwa kenegaraan, sangat tidak dikehendaki terjadinya interupsi pasokan daya listrik.

Untuk mendapatkan pasokan daya yang tinggi keandalannya, digunakan unit pembangkit khusus yang berupa:

### 1. *Uninterrupted Power Supply Electronic.*

Gambar III.53 menggambarkan rangkaian dari *uninterrupted power supply electronic* yang mengambil daya dari jaringan umum (PLN). Kemudian digunakan untuk mengisi baterai aki melalui penyearah. Dari baterai aki, daya dialirkan melalui inverter yang mengubah arus searah

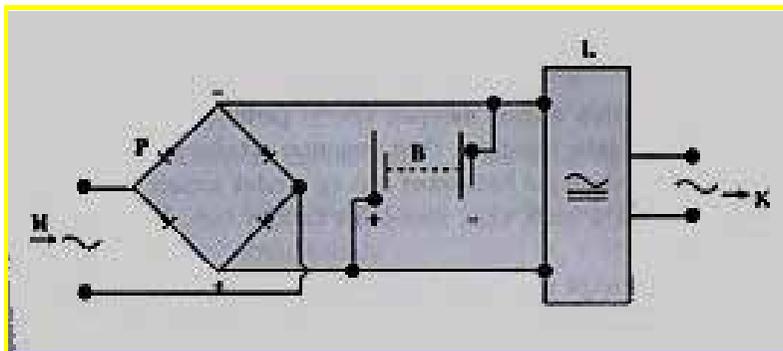
menjadi arus bolak-balik ke instalasi pemakai yang memerlukan keandalan tinggi.

### 2. No Break Diesel Generating Set.

Gambar III.54 menggambarkan rangkaian dari *no break diesel generating set*. Dalam keadaan pasokan daya dari PLN normal, generator yang memasok pemakai diputar oleh motor sinkron yang mengambil daya dari jaringan PLN. Kalau pasokan daya dari jaringan PLN hilang, maka kopling mekanis antara roda gila yang diputar motor sinkron dan mesin Diesel masuk sehingga mesin Diesel tersebut diputar oleh roda gila dan kemudian mesin diesel ini hidup, untuk selanjutnya memutar generator sinkron menggantikan fungsi motor sinkron pemutar generator sinkron.

### 3. Short Break Diesel Generating Set.

Gambar III.55 menggambarkan rangkaian dari *short break diesel generating set*. Apabila pasokan daya dari PLN hilang, maka dalam waktu tertentu, unit pembangkit diesel ini di-start secara otomatis oleh baterai aki. Setelah putaran (frekuensi) dan tegangannya mencapai nilai nominal, saklar S berpindah posisinya dari PLN ke unit pembangkit diesel sehingga pemakai mendapat pasokan dari unit pembangkit Diesel bersangkutan. Proses ini membutuhkan interupsi pasokan daya ke pemakai dalam waktu kurang dari satu menit (*short break*). Sewaktu pasokan daya dari PLN normal kembali, saklar S sebaiknya dikembalikan ke posisi PLN secara manual sambil mematikan unit pembangkit dieselnnya.



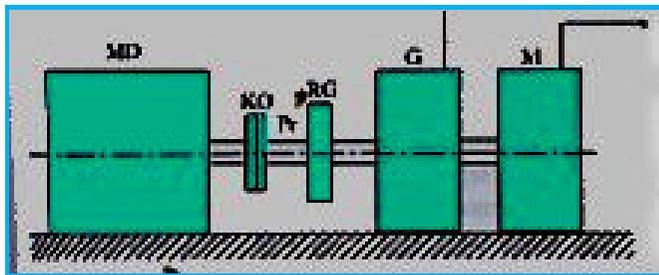
Gambar III.53

Sirkuit Dasar *Uninterrupted Power Supply*

Keterangan:

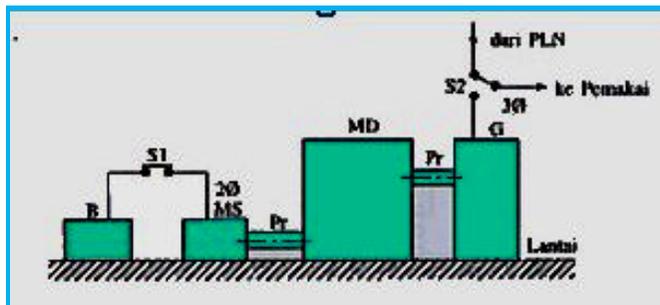
B : Baterai aki; I : Inverter; pengubah arus searah menjadi bolak-balik; K : Keluaran berupa tegangan bolak-balik; M Masukan berupa pasokan tegangan bolak-balik; P Penyearah.

Masukan dari PLN



Gambar III.54

Skema dan Prinsip Kerja *Short Break Diesel Generating Set*



Gambar III.55

Skema dan Prinsip Kerja *Short Break Switch*

## I. Pembangkit Listrik Nonkonvensional

Pembangkit listrik non-konvensional umumnya masih dalam tahap riset sehingga belum merupakan pusat listrik. Khusus untuk pembangkit listrik tenaga surya, sudah banyak dibangun di tempat-tempat yang jauh dari jaringan PLN dengan memanfaatkan energi matahari. Pembangkit-pembangkit listrik nonkonvensional ini adalah:

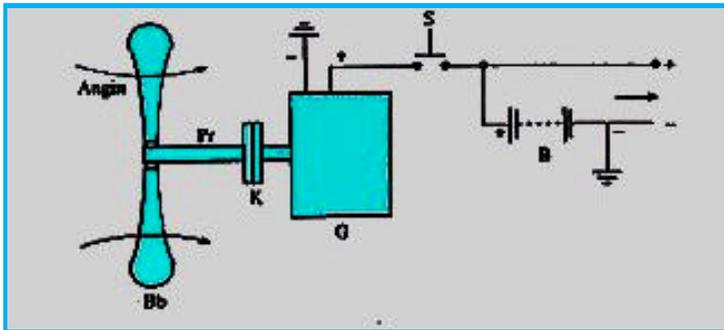
### 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya.

Pada prinsipnya, pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari sekelompok foto sel, sinar matahari menjadi gaya gerak listrik (GGL) untuk mengisi baterai aki (B). Dari baterai aki (B), energi listrik dialirkan ke pemakai. Pada waktu banyak sinar matahari (siang hari), baterai aki (B) diisi oleh fotosel. Tetapi pada saat malam hari, foto sel tidak menghasilkan energi listrik, maka energi listrik diambil dari baterai aki (B) tersebut.

## 2. Pembangkit Listrik Tenaga Angin.

Energi angin diubah oleh baling-baling (turbin angin) menjadi energi pemutar generator arus searah. Apabila tegangan generator cukup tinggi, relai tegangan akan menutup saklar pengisi baterai aki sehingga baterai aki diisi oleh generator. Apabila angin berkurang dan agar tidak terjadi aliran daya balik dari baterai aki ke generator, maka relai daya balik akan membuka saklar tadi. Pasokan daya untuk pemakai diambil dari baterai aki.

Sesungguhnya, tenaga angin ini termasuk tenaga surya secara tidak langsung karena baik angin lokal (misalnya angin darat dan angin laut) maupun angin planet terjadi akibat pemanasan ke bumi oleh matahari (secara langsung) yang selanjutnya menimbulkan perbedaan suhu di antara tempat di permukaan bumi ini.



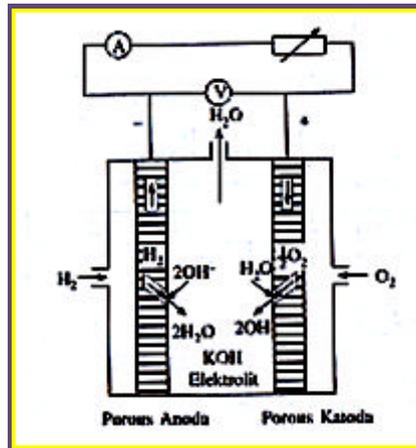
Gambar III.56

Skema Unit Pembangkit Tenaga Angin

Bb : Baling-baling; Pr : Poros; B : Baterai Aki; K : Kopling Permanen; S: Sakelar Otomatis; G : Generator

## 3. Fuel Cell (Sel Bahan Bakar)

Gambar III.57 menunjukkan prinsip kerja *fuel cell* (sel bahan bakar). Sebagai bahan bakar adalah H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> yang masing-masing dimasukkan ke kutub negatif (anoda) dan kutub positif (katoda). Setiap kutub, sifatnya berpori (berlubang-lubang) dan di antara anoda dan katoda ini terdapat larutan KOH. Larutan KOH menghasilkan ion negatif OH<sup>-</sup> pada kutub negatif anoda berpori dengan gas hidrogen H<sub>2</sub>, akan bereaksi menjadi H<sub>2</sub>O dan melepas elektron e<sup>-</sup> sehingga anoda menjadi elektron yang bermuatan negatif. Elektron-elektron ini kemudian mengalir ke beban dan sampai ke kutub positif katoda. Di katoda, elektron tersebut bertemu dengan oksigen O<sub>2</sub> yang dimasukkan ke kutub positif katoda sehingga elektron bersama O<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O (dari larutan KOH) menghasilkan ion negatif OH<sup>-</sup> yang selanjutnya akan digunakan untuk menghasilkan elektron pada kutub negatif anoda seperti tersebut di atas.



Gambar III.57  
Prinsip Kerja *Fuel Cell*

Larutan KOH tidak ikut bereaksi, larutan tersebut hanya menjadi katalisator penghasil ion OH<sup>-</sup>. Sebagai elektroda dapat digunakan logam nikel atau platina, sedangkan untuk larutan, selain KOH, bisa juga digunakan larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> atau larutan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. *Fuel cell* telah digunakan dalam kendaraan ruang angkasa dan sedang dalam pengembangan agar pemakaiannya dapat diperluas, dan diharapkan di masa yang akan datang dapat digunakan secara komersial sebagai sumber energi.

## J. Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan untuk pembangkitan tenaga listrik ada yang berbentuk padat, cair, maupun gas. Bahan bakar padat yang banyak digunakan adalah batubara. Untuk bahan bakar cair dan gas, pembangkitan tenaga listrik banyak menggunakan minyak bumi dan gas bumi.

### 1. Bahan Bakar Padat

Di Filipina, pernah direncanakan PLTU menggunakan kayu (dan turunannya yang disebut juga biomassa) sebagai bahan bakar dengan harapan agar didapat sumber energi terbarukan (*renewable energi*). Jenis kayu yang digunakan dalam bahasa Filipina disebut ipil-ipil, yakni sejenis kayu lamtoro. Untuk penyediaan bahan bakar kayu ini diperlukan lahan yang luas bagi penanaman kayu ipil-ipil ini untuk dapat memasok kayu bagi PLTU secara kontinu dengan daya terpasang tertentu.

Penggunaan kayu ini dapat juga dianggap sebagai energi surya tidak langsung karena kayu adalah hasil fotosintesis yang terjadi dengan bantuan energi surya langsung.

Bahan bakar yang lain adalah sampah kota. Di negara-negara maju, sampah kota dijadikan bahan bakar PLTU, tetapi yang menjadi sasaran utama bukanlah pembangkitan listriknya, melainkan menyelesaikan masalah sampah kota. Batubara berasal dari hutan (kayu) yang tertimbun dalam tanah, di mana makin tua umumnya, maka makin tinggi nilai kalorinya.

Batubara pada dasarnya adalah Karbon (C) yang didapat dari tambang dengan kualitas berbeda-beda, karena tercampur dengan bahan-bahan lain yang tergantung pada kondisi tambangnya. Hal-hal yang menentukan mutu batubara, antara lain adalah nilai kalorinya. Nilai kalori ini ada 2 macam, yaitu nilai atas ( $H_o$ ) dan nilai bawah ( $H_u$ ).

Nilai atas kalori bahan bakar didapat dengan cara membakar bahan bakar tersebut sebanyak satu kilogram dan mengukur kalori yang didapat dengan menggunakan kalorimeter pada suhu  $15^{\circ}\text{C}$  sehingga uap air yang didapat dari pembakaran ini (hasil pembakaran) mengembun dan melepaskan kalori pengembunannya. Sedangkan nilai bawah kalori bahan bakar didapat dengan cara mengurangi nilai atasnya dengan kalori pengembunan yang dikandung.

Pembakaran bahan bakar pada pembangkit listrik termal mengeluarkan gas buang pada suhu yang jauh di atas titik embun air, perhitungan neraca energi didasarkan pada nilai bawah kalori karena pada suhu gas buang setinggi itu air berada pada fase uap.

Selain oleh nilai kalori yang dimilikinya, mutu batubara juga ditentukan oleh kemurniannya. Batubara selalu ditemplei zat-zat lain, seperti air serta unsur H, O, N, dan S. Tingkat kemurnian batu bara selain menyangkut umumnya, juga dipengaruhi oleh tambang asal tempat batu bara diambil. Tabel III.1 di bawah ini menunjukkan klasifikasi batubara secara singkat.

Bahan bakar padat seperti batubara dibakar dalam ruang bakar ketel uap PLTU untuk mendapatkan energi. Pembakaran itu sendiri sesungguhnya adalah reaksi kimia dengan oksigen  $\text{O}_2$  yang ada dalam udara.

Karena batubara tercampur dengan unsur-unsur H, O, N, dan S, maka pada proses pembakaran batu timbul reaksi kimia antara unsur-unsur tersebut dengan oksigen yang ada di udara.

Yang selanjutnya dengan H<sub>2</sub>O yang ada di udara dapat bereaksi menjadi bermacam-macam asam nitrat (HNO<sub>x</sub>).

Tabel III.1.Klasifikasi serta data batubara

No.	Jenis batu bara	Kandungan (%)					Nilai kalori Kcal/Kg	
		C	H	O	N	S	H <sub>o</sub>	H <sub>u</sub>
1.	Lignite	63,6-72,5	5,0-5,6	17,5-27,5	0,5-17,5	0,3-6,5	2012-5230	1540-4925
2.	Bituminus Coal	73,9	5,5	15,0	1,4	4,2	5671	5389
3.	Open Burning-Coal	77,0-85,0	5,2-5,4	7,2-11,9	1,2-2,1	0,7-5,7	5864-7342	5579-7703
4.	Gas Coal	82,3-87,8	5,2-5,3	4,6-8,0	1,4-1,6	0,8-1,5	6986-7874	6694-7606
5.	Fat Coal	86,9-88,7	4,8-4,9	4,1-5,8	1,58-1,60	0,66-0,92	7168-7650	6901-7398
6.	Forge Coal	90,2	4,3	3,2	1,58	0,67	7694	7463
7.	Hard Coal	90,7-90,9	3,8-4,0	2,5-2,7	1,50-1,74	0,84-1,30	7150-7763	6929-7522
8.	Anthracite	91,8-93,7	2,3-3,6	23-2,6	0,80-1,38	0,71-0,89	7183-7676	7061-7482

Sumber: Djiteng Marsudi hal. 134

Apabila batubara *lignite* ada unsur kandungan airnya melebihi 60% sedangkan pada energi dalam bentuk batubara yang banyak mengandung air dan abu, serta rendah nilai kalorinya lebih mahal daripada mengangkut energi dalam bentuk listrik yang dihasilkan di dekat tambang bersangkutan.

Selain hal tersebut di atas, penggunaan batubara dengan nilai kalori yang relatif rendah memerlukan ketel uap yang lebih besar daripada apabila digunakan batubara dengan nilai kalori yang relatif tinggi karena jumlah kilogram batubara yang harus dibakar per satuan waktu menjadi lebih besar untuk mencapai daya bangkitan yang sama.

Dalam menyediakan batubara untuk PLTU juga harus diperhatikan ada tidaknya unsur yang dapat merusak ketel uap yang terbawa oleh batubara seperti silika yang dapat menyebabkan korosi suhu tinggi. Di lain pihak, kandungan unsur S yang dapat menimbulkan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sesuai reaksi (3.9) pada bagian PLTU yang suhunya relatif dingin (di bawah 180°C), yaitu di pemanas udara, bisa mengembun dan menimbulkan korosi suhu rendah.

Dalam penyediaan batubara untuk PLTU juga harus diperhatikan tingkat kekerasan batubara. Hal ini berkaitan dengan kekuatan mesin giling pembuat serbuk batubara dari PLTU bersangkutan.

Unsur-unsur tersebut di atas dapat terbakar, bereaksi dengan O<sub>2</sub> yang menghasilkan energi panas. Tetapi ada juga zat-zat yang tidak bisa

terbakar, seperti air dan abu yang dikandung batubara. Karena hasil pembakaran batubara menimbulkan gas-gas ikutan yang membuat pencemaran, maka dikembangkan berbagai teknik untuk mengurangi pencemaran. Salah satu cara untuk mengurangi pencemaran oleh gas buang hasil pembakaran batubara ialah dengan menggunakan *fluidized bed combustion*, di mana batu bara dialirkan bersarna air pencuci ruang bakar.

## 2. Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair dan gas adalah persenyawaan hidrokarbon, artinya molekulnya terdiri dari atom-atom C-H. Mengenai bentuknya (cair atau gas) disebabkan karena suhu pengembunannya yang berbeda. Bahan cair, suhu pengembunannya ada di atas suhu ruangan (*ambient temperature*), sedangkan bahan bakar gas mempunyai suhu pengembunan di bawah suhu ruangan.

Bahan bakar cair yang banyak digunakan adalah minyak bumi, dan biasa disebut bahan bakar minyak (BBM), yang didapat dari tambang darat maupun tambang lepas pantai dalam bentuk minyak mentah (*crude oil*).

Minyak bumi ini berasal dari binatang-binatang laut yang tertimbun dalam tanah selama berjuta-juta tahun. Oleh karena itu, minyak bumi selalu didapat di dataran rendah dekat pantai yang diduga dulunya adalah laut atau di lepas pantai. Minyak mentah yang didapat dari tambang, kemudian diolah dalam kilang minyak. Dalam kilang minyak, minyak mentah ini didestilasi sehingga produk dari kilang ada yang berupa minyak hasil destilasi dan minyak sisa destilasi (residu). Minyak hasil destilasi sifatnya ringan, sedangkan yang hasil residu berat. Tabel III.2 menggambarkan data teknis utama dari BBM.

Tabel III.2. Data Teknis Bahan Bakar Minyak

Jenis BBM	Berat Jenis	Kandungan (%)					Nilai Kalor (Kcal/Kg)		
		C	H	O	N	S	Ho	Hu	
Ekstra Ringan	0,840	85,9	13,0	0,4	0,4	0,7	10.880	10.200	
Ringan	0,880	85,5	12,5	0,8	0,8	1,2	10.70	10.050	
Medium	0,920	85,3	11,6	0,6	0,6	2,5	10.35	9.725	
Berat	0,9770	84,0	11,0	0,39	0,39	3,5	10.20	9.600	
Ekstra Berat	-	-	-	-	-	-	-	9.200	
Ter (Coal Tar)	1,02-1,10	89,8	6,5	1,7	1,2	0,8	9.300	9.000	

Sumber: Djiteng Marsudi, hal. 136

Di Indonesia, BBM yang disediakan oleh PERTAMINA yang tergolong ekstra ringan adalah bensin, yang tergolong ringan adalah solar (High Speed Diesel), yang tergolong medium adalah Intermediate diesel Oil/IDO dan kerosin (minyak tanah), yang tergolong berat adalah *marine fuel oil* LIMFO, dan yang tergolong ekstra berat adalah parafin (*wax*).

Bahan bakar minyak terdiri dari beberapa persenyawaan *hidrokarbon*. Persenyawaan *Hidrokarbon* yang terdapat dalam BBM terdiri dari 3 kelompok:

- a. *Aliphatics*
- b. *Naphthenes (Cydanes)*
- c. *Aromatics*

Tabel III.3 menggambarkan susunan atom pada molekul *aliphatics*, ada yang jenuh dengan atom hidrogen dan ada yang tidak jenuh. Tergantung kepada tingkat kejenuhan ini, kelompok *aliphatics* dibagi atas sub-kelompok:

- a. Parafin atau alkanes dengan rumus  $CH_{2n+2}$
- b. Olefin (alkenes) dengan rumus  $CH_{2n-2}$
- c. Acetylenes dengan rumus  $C_{112n-2}$

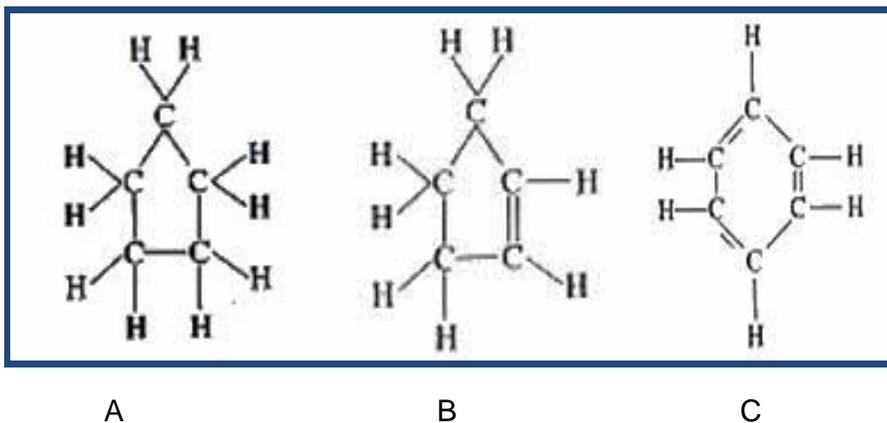
Sub-kelompok parafin adalah jenuh dengan atom H. Atom H di sini mempunyai ikatan tunggal (*singlebonded*). Bentuk yang paling sederhana dari sub-kelompok parafin adalah methane dengan rumus  $C_{14}$  yang berbentuk gas karena titik didihnya =  $-164^{\circ}C$ .

Sub-kelompok olefin tidak jenuh dengan atom H. Susunan atomnya berbentuk rantai terbuka, tetapi ikatannya merupakan ikatan ganda (*double bond*) antara dua atom C. Bentuk yang paling sederhana dari sub-kelompok ini adalah ethylene dengan rumus  $CA$  Yang berbentuk gas karena titik didihnya =  $-103^{\circ}C$ .

Sub-kelompok *acetylenes* juga tidak jenuh dengan atom H. Susunan atomnya berbentuk rantai terbuka dengan ikatan rangkap tiga (*triple bond*) antara dua atom C. Bentuk yang paling sederhana dari sub-kelompok ini adalah acetylene dengan rumus  $C_2H_2$  berbentuk gas karena titik didihnya =  $-82,5^{\circ}C$ .

Kestabilan termis dari kelompok *aliphatics* menjadi lebih tinggi apabila rantai molekulnya lebih pendek.

Kelompok Naphthenes mempunyai molekul dengan susunan atom berbentuk rantai tertutup (ring). Apabila Rantai tertutup ini hanya mengandung ikatan tunggal, hidrokarbon ini disebut *cyclic saturated* hidrokarbon dengan rumus umum  $C_nH_{2n}$ . yang mempunyai satu ikatan ganda disebut *cyclic* tidak jenuh  $C_nH_{2n-2}$  yang mempunyai dua ikatan ganda disebut *cyclic* tidak jenuh  $C_nH_{2n-4}$ , dan seterusnya. Bahan bakar minyak (BBM) dari kelompok Naphthenes bisa mengandung Cyclopentane  $C_5H_{10}$  dan Cyclohexane  $C_6H_{12}$ . Molekul Cyclopentane dengan buah atom C dapat mengikat 10 atom H apabila hanya ada ikatan tunggal antar atom C yaitu  $C_5H_{10}$ , tetapi bila ada ikatan ganda antara atom C, maka hanya 8 atom H yang dapat diikat menjadi  $C_5H_8$ . Hal ini digambarkan oleh Gambar III.58.



Sumber Djiteng Marsudi, hal. 137

Gambar III.58A. Struktur molekul cyclopentane  $C_5H_{10}$ .

Gambar III.58B. Struktur molekul cyclopentene  $C_5H_8$ .

Gambar III.58C. Struktur molekul, benzene  $C_6H_6$ .

Molekul yang mempunyai ikatan atom berupa rantai tertutup (ring) secara kimia lebih stabil dibandingkan gas yang strukturnya rantai terbuka. Oleh karena itu, kelompok naphthenes lebih stabil dibanding kelompok parafin. Pada perubahan suhu, susunan kimianya tidak mudah berubah.

Kelompok aromatics mempunyai susunan molekul berupa rantai tertutup (*ring*), tetapi lain dari pada kelompok thenes, kelompok aromatics ini mengandung ikatan ganda antara atom-atom C-nya.

Molekul dengan struktur atom berbentuk rantai tertutup (*ring*) dengan inti molekul benzene secara termal lebih stabil daripada yang struktur atomnya berbentuk *ring* sederhana (*naphthenics*). Oleh karena itu,

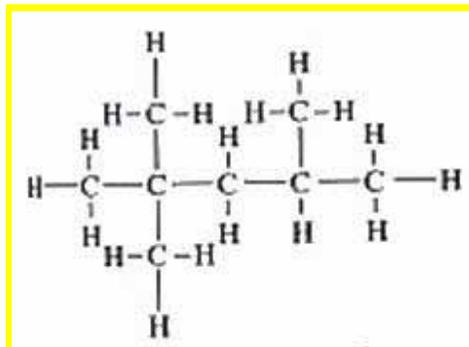
penyalaan hidrokarbon aromatic memerlukan suhu yang lebih tinggi dalam ruang bakar dibanding dengan penyalaan *hidrokarbon aliphatic*.

Di samping *hidrokarbon* yang normal, ada juga hidrokarbon yang mempunyai cabang berupa rantai dari tai terbuka (isomer) dan cabang berupa rantai dari ring.

Contoh dari *hidrokarbon* dengan struktur rantai uka yang bercabang adalah isooctane  $C_8H_{18}$  yang mempunyai kelompok methyl ( $CH_3$ ).

Molekul isooctane secara termal lebih stabil daripada molekul dengan struktur atom berupa rantai terbuka, isooctane normal  $C_8H_{18}$ . Contoh dari hidrokarbon dengan cabang struktur ring adalah toluena, yaitu sebuah ion hidrogen yang diganti oleh kelompok methyl  $CH_3$ . Molekul toluena secara termal lebih stabil daripada, molekul benzene.

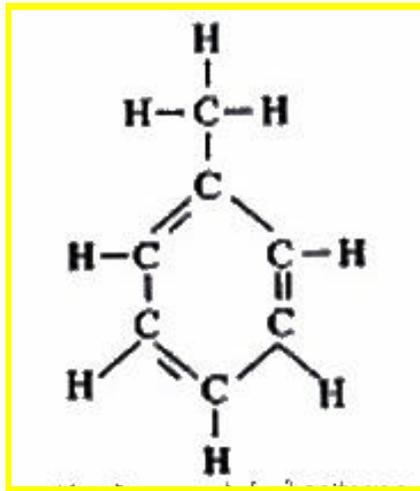
Tabel III.3 menggambarkan komposisi BBM Diesel yang diproduksi di Soviet.



Sumber Djiteng Marsudi, hal. 137

Gambar III.59.

Isooctane  $C_8H_{18}$  dengan cabang methyl  $CH_3$ .



Sumber Djiteng Marsudi, hal. 137

Gambar III.60

Struktur molekul toluene di mana salah satu atom H diganti dengan rantai methyl  $\text{CH}_3$

Waktu yang diperlukan untuk membakar habis BBM diesel dalam ruang bakar silinder mesin diesel N cepat bagi BBM yang mempunyai berat molekul juga berat (jenisnya) kecil dibanding dengan yang mempunyai berat molekul besar. Oleh sebab itu, untuk mesin diesel putaran tinggi diperlukan BBM yang lebih ringan daripada untuk mesin diesel dengan putaran rendah.

Pembakaran BBM dalam silinder mesin diesel terjadi karena ada penyalan sendiri (*self ignition*) BBM yang disemprotkan ke dalam ruang silinder yang berisi udara mampat bersuhu tinggi. Suhu penyalan sendiri ini, ialah suhu minimum yang dapat menyalakan suatu BBM. Suhu ini harus tercapai sewaktu lang kompresi mesin diesel mendekati titik mata atas saat BBM disemprotkan ke dalam silinder.

BBM yang akan dibakar dalam silinder mesin diesel perlu disaring terlebih dahulu agar tidak menyumbat pengabut dan juga tidak membawa zat-zat yang tidak dapat terbakar, yang akan menimbulkan kerak dalam silinder. Kerak berupa endapan karbon disebabkan karena pembakaran yang tidak sempurna terhadap karbon ini.

Tabel III.3 Struktur molekul *hydrocarbon aliphatic*

Parafins (Ikatan Tunggal)	<b>Methane</b> $\text{CH}_4$ $\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H} \end{array}$	<b>Ethane</b> $\text{C}_2\text{H}_6$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\   \   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \   \\ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	<b>Propane</b> $\text{C}_3\text{H}_8$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\   \   \   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \   \   \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	<b>Hexane</b> $\text{C}_6\text{H}_{14}$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\   \   \   \   \   \   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \   \   \   \   \   \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$
Olefins (Ikatan Ganda)		<b>Ethylene</b> $\text{C}_2\text{H}_4$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\   \   \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{H} \end{array}$	<b>Propylene</b> $\text{C}_3\text{H}_6$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\   \   \   \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \   \\ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	<b>Hexylene</b> $\text{C}_6\text{H}_{12}$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\   \   \   \   \   \   \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \   \   \   \   \   \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$
Acetylenes (Ikatan Triple)		<b>Ethylene</b> $\text{C}_2\text{H}_2$ $\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\   \   \\ \text{H}-\text{C} \equiv \text{C}-\text{H} \end{array}$	<b>Propylene</b> $\text{C}_3\text{H}_4$ $\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C} \equiv \text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H} \end{array}$	

Sumber Djiteng Marsudi, hal. 138

Tabel III.4.  
Komposisi BBM Diesel Produk Soviet (Menurut Tolstov)

Minyak Mentah	Kandungan Hidrokarbon (%)			
	Aromatis	Nephthane	Methane	Basis Kimia
<b>Minyak Solar (Destilasi)</b>				
1. Minyak Mentah dari Dossor	12,4	62,1	25,5	Methane-Nephthane
2. Minyak Parafin dari Grozny	13,5	47,6	38,9	Methane-Nephthane
3. Minyak Ringan dari Bibi Eibat	27,4	58,2	114,4	Aromatic-Nephthane

Sumber Djiteng Marsudi, hal. 138

### 3. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas (1313G) yang digunakan untuk pembangkitan tenaga listrik umumnya gas bumi, yaitu gas yang didapat dari dalam bumi yang berasal dari kantong gas yang hanya berisi gas yang dalam bahasa Inggris disebut *natural gas*, atau dari kantong gas yang ada di atas kantong minyak yang dalam bahasa Inggris disebut *petroleum gas* (lihat Gambar III.61 A dan Gambar III.61 B).

Bahan bakar cair dan bahan bakar gas adalah sama-sama persenyawaan hidrokarbon. Hanya saja gas dalam keadaan normal artinya pada suhu dan tekanan udara bebas berada dalam fase gas karena titik didihnya (yang juga titik embunnya) berada jauh di bawah 0° C.

Agar dapat dengan mudah diangkut dalam jarak yang jauh, ada gas yang dicairkan dalam bejana bertekanan tinggi seperti *liquefied natural gas* (LNG) dan elpiji (*liquefied petroleum gas* /LPG). Gas elpiji dalam tabung banyak digunakan sebagai bahan bakar keperluan rumah tangga di Indonesia. Gas LNG dari Indonesia diekspor, antara lain ke Jepang di mana di Jepang digunakan untuk pembangkitan tenaga listrik.

Di Indonesia, pusat-pusat listrik yang menggunakan BBG umumnya dipasok melalui pipa. Pipa pemasok gas adalah milik perusahaan gas atau milik PERTAMINA. Instalasi pipa pemasok gas harus dilengkapi dengan pengatur tekanan, katup penyetop pasokan, pengukur pemakaian gas, saringan serta penangkap air dan kotoran. Pasokan gas bagi pusat listrik, misalnya bagi PLTU dan PUG, tekanannya sedikit mungkin harus konstan agar tidak menyebabkan nyala gas (lidah api gas) dalam ruang bakar terganggu yang selanjutnya dapat menimbulkan gangguan penyediaan tenaga listrik.

Berbeda dengan pada pemakaian bahan bakar padat dan bahan bakar cair, pada pemakaian bahan bakar gas, tidak ada tempat penimbunan. Tetapi pada pemakaian gas, bahaya terjadinya kebakaran paling besar. Hal ini disebabkan oleh kebocoran gas tidak terlihat oleh mata.

Pemakaian bahan bakar gas umumnya dinyatakan dalam *standard cubic foot* (SCF), di mana yang dimaksud dengan standard di sini adalah dalam keadaan suhu 60° (Fahrenheit) dan tekanan 30 inci air raksa (Hg). Dalam pembangkitan tenaga listrik, sering digunakan besaran MMSCF, yaitu juta *standard cubic foot*. Karena keadaan di lapangan seringkali tidak sama dengan keadaan standard tersebut di atas, maka diperlukan rumus untuk mengkonversikan keadaan lapangan ke keadaan standard:

$$\frac{p_m - p_n \times 520 \times V_m}{30t_m + 460} \quad (3-4)$$

Keterangan:

$V_m$ =volume gas pada tekanan  $p_m$  dan suhu  $t_m$  [cubic foot = ft<sup>3</sup>]

$p_m$ =tekanan absolut gas pada alat pengukur [inci Hg]

$p_n$ =tekanan uap air yang diambil dari tabel standar tekanan uap [inci Hg]

$t_m$ =suhu gas pada alat ukur [Fahrenheit]

Nilai  $p_n$  bisa didapat dari Tabel III.5 yang menggambarkan sifat termodinamika dari uap.

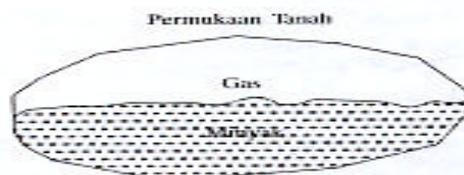
Tabel III.5  
Hubungan Tekanan Uap dengan Suhu

Suhu (derajat F)	Tekanan (inch Hg)	Keterangan
40	0,2478	1. Hubungan antara derajat Fahrenheit dan derajat Celcius: $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F}-32) \times \frac{5}{9}$ 2. 1 inch = 2,54 cm Hg 3. 30 inci Hg praktis = 76 inch Hg, yaitu tekanan udara (barometer) di tepi pantai.
45	0,3004	
50	0,3626	
55	0,4359	
60	0,5218	
65	0,6222	
70	0,7392	
75	0,8750	
80	1,0321	
85	1,2133	
90	1,4215	
95	1,6600	
100	1,9325	
105	2,2429	
110	2,5955	

Permukaan Tanah



Gambar III.61 A  
Kantong Gas Berisi Gas Saja (*Natural Gas*)



Gambar III.61 B  
Kantong Gas Berada di atas Kantong Minyak (*Petroleum Gas*)

Tabel III.6.  
Komposisi Gas Alam dari Berbagai Tempat

Asal	Densi Ty Kg/ m <sup>3</sup>	Komposisi dalam % volume Kcal/kg										
		CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ho	Hu
California (USA)	0,850	-	-	86,8	7,2	4,3	-	-	0,5	-	10,900	9,860
Texas (USA)	0,775	-	-	89,8	2,3	-	-	-	a,2	7,7	8,930	8,030
Jerman (Bentheim)	0,754	-	-	93,2	0,6	-	-	-	-	6,2	8,960	8,060
Austria	0,751	-	-	0,7	94,7	1,8	0,2	-	-	1,2	9,380	8,440
Mali (Cortemaggiore)	0,766	-	-	94,7	1,8	0,2	-	-	1,4	1,2	9,380	8,440
Perancis (Lacq. Raw)	1,034	-	-	69,52	3,2	1,42	-	15,30	9,60	-	8,740	7,900
Perancis (Lacq. Pure)	0,746	-	-	95,9	3,2	0,5	-	-	-	0,4	9,780	8,800
Sahara (Hassi WWI)	0,928	-	-	81,3	6,8	2,3	-	-	0,5	4,8	11,040	9,990
USSR (Saratow)	0,772	-	-	93,1	2,5	1,5	-	-	0,6	2,3	9,640	8,680

Sumber Djiteng Marsudi, hal. 143

Dari uraian di atas, terlihat bahwa kebutuhan oksigen O<sub>2</sub> untuk pembakaran gas alam tergantung pada komposisinya. Seperti halnya pada bahan bakar minyak, komponen terbesar pada gas alam seperti terlihat pada Tabel III.6 adalah CH<sub>4</sub> (methane) dan gas ini akan terbakar.

Dibandingkan dengan batubara dan bahan bakar minyak, sebagai bahan bakar, gas alam relatif lebih bersih karena tidak membawa banyak unsur yang berasal dari dalam tanah yang dapat merusak alat-alat unit pembangkit, seperti silika, belerang, vanadium, kalium, dan natrium. Oleh karena itu, unit pembangkit termal yang memakai gas bisa mempunyai selang waktu pemeliharaan yang lebih lama dibanding apabila memakai batubara atau memakai BBM.

### K. Turbin Cross Flow

Turbin *crossflow* adalah turbin air yang akhir-akhir ini dikembangkan untuk tinggi terjun antara 3-10 meter dengan debit air yang besarnya mencapai 30 m<sup>3</sup>/detik. Konstruksi turbin ini digambarkan oleh Gambar III.63 dan tampak bahwa roda air turbin *crossflow* panjang yang berfungsi menangkap air yang tedun dari sungai. panjangnya roda air ini tergantung pada banyak sedikitnya air yang akan ditangkap.

Dengan konstruksi yang panjang ini, maka bangunan sipil pengarah air menjadi sederhana, tetapi pengaturan daya sulit dilakukan. Oleh karena

itu, turbin ini hanya baik untuk beban konstan, misalnya menggerakkan generator asinkron dan paralel dengan sistem besar.

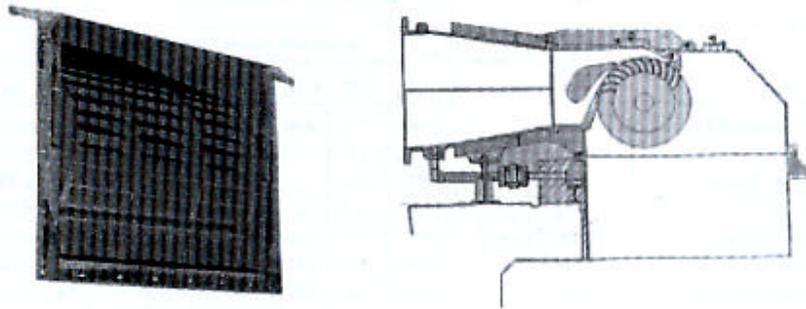
Daya yang dihasilkan turbin *cross flow* terbesar baru berkisar di sekitar 400 M, cocok untuk listrik pedesaan karena konstruksinya yang relatif sederhana.

#### L. Perlindungan Katodik (*Cathodic Protection*)

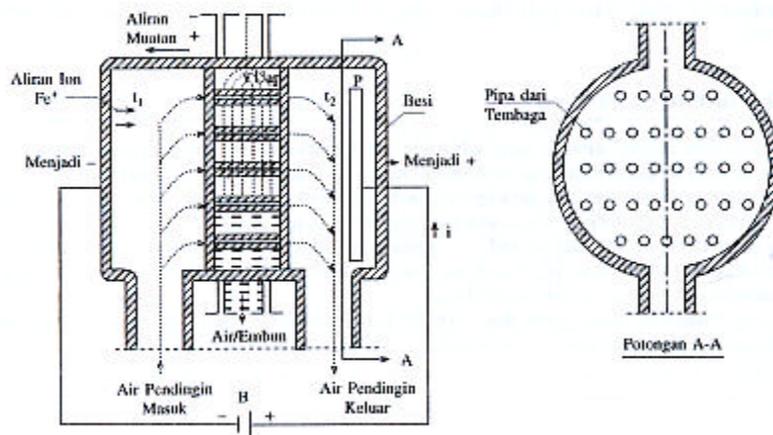
Masalah perlindungan katodik terutama timbul pada instalasi PLTU, yaitu di kondensor, di pipa masuk air pendingin (*water intake*) dan di dermaga tempat membongkar bahan bakar. Perlindungan katodik ini diperlukan untuk mencegah efek elektrolisis yang terjadi yang bisa menyebabkan bagian-bagian instalasi menjadi keropos. Efek elektrolisis ini terjadi karena adanya zat yang dalam hal ini air (pendingin) yang menempel pada bagian-bagian instalasi dengan suhu yang berbeda sehingga timbul beda potensial antara bagian-bagian instalasi yang selanjutnya menimbulkan arus listrik.

Gambar III.64 menggambarkan efek elektrolisis yang timbul dalam sebuah kondensor PLTU. Air pendingin yang keluar dari kondensor mempunyai suhu  $t_2$  yang lebih tinggi daripada suhu air pendingin yang masuk kondensor, yaitu  $t_1$ . Dinding kondensor yang kanan, yaitu bagian yang terkena air yang bersuhu  $t_2$  akan lebih banyak melepas elektron bebasnya daripada dinding kiri yang bersentuhan dengan air masuk yang bersuhu  $t_1$ . Akibatnya, dinding kanan mempunyai potensial listrik yang lebih positif dari pada dinding kiri.

Selanjutnya arus listrik akan mengalir dari dinding kanan ke dinding kiri melalui dinding atas dan bawah kondensor. Di dalam air (pendingin) yang ada dalam kondensor, arus listrik mengalir dari kiri ke kanan. Hal ini menyebabkan ion-ion  $Fe^+$  mengalir dari dinding kiri ke dinding kanan. sehingga timbul efek elektrolisis. Ion-ion  $Fe^+$  ini sebagian ada yang mengalir dan menempel pada pipa-pipa kondensor yang terbuat dari tembaga, karena tembaga lebih banyak melepas elektron bebas ke dalam air daripada besi sehingga potensial listriknya menjadi lebih positif daripada besi.



Gambar III.62  
Turbin Cross Flow Buatan Toshiba



Gambar III.63  
Aliran Air Pendingin dan Uap Dalam Kondensor PLTU

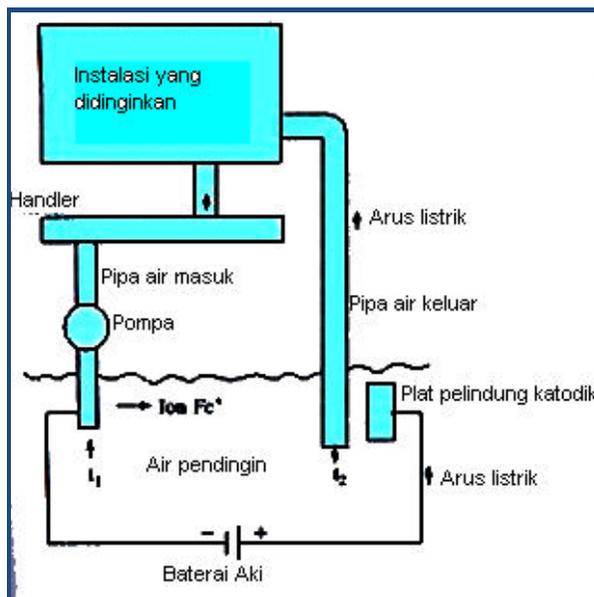
Efek elektrolisis tersebut di atas lama kelamaan menyebabkan menipisnya dinding kiri dan menebalnya dinding kanan. Begitu pula pipa-pipa tembaga akan menebal karena ditemplei besi yang berasal dari aliran ionion  $Fe^+$ .

Penipisan dinding kiri dari kondensor lama kelamaan dapat merusak dinding tersebut karena menjadi keropos. Di lain pihak, penebalan/pelapisan pipa-pipa kondensor yang terbuat dari tembaga dengan besi akan mengurangi daya hantar panasnya karena besi mempunyai daya hantar yang lebih rendah daripada tembaga. Hal ini selanjutnya akan menurunkan kapasitas pendinginan dari kondensor tersebut.

Untuk mencegah terjadinya efek elektrolisis yang tidak menguntungkan seperti tersebut di atas, maka dipasang rangkaian listrik perlindungan katodik seperti ditunjukkan oleh Gambar III.64.

Prinsip kerja rangkaian ini adalah menyuntikkan arus listrik searah yang arahnya berlawanan dengan arah arus listrik yang menyebabkan timbul efek elektrolisis. Rangkaian ini menggunakan pelat pelindung katodik yang dikorbankan karena akan terimakan dalam proses elektrolisis yang terjadi. Jika pelat pelindung katodik ini habis terelektrolisis, pelat ini dapat diganti dengan yang baru.

Selain gaya gerak listrik (GGL) yang timbul antara dinding kanan dan kiri dalam kondensor seperti uraian tersebut di atas, masih ada gaya gerak listrik lain yang terjadi, yaitu GGL kontak antara pipa tembaga dengan dinding besi tempat pipa tembaga tersebut dipasang. GGL kontak ini lebih besar di sebelah kanan daripada di sebelah kiri, karena suhu di sebelah kanan ( $t_2$ ) lebih besar daripada suhu di sebelah kiri ( $t_1$ ). GGL kontak ini akan menimbulkan arus listrik yang bersirkulasi dari ujung pipa tembaga kanan ke dinding besi kanan tempat pipa ini dipasang, ke dinding besi atas dan bawah, ke dinding kiri tempat pipa tembaga ini dipasang, ke ujung pipa tembaga di tempat di mana dipasang, yaitu di dinding kiri terus melalui pipa tembaga kembali ke ujung kanan dari pipa tembaga tempat di mana menempel pada dinding besi.



Gambar III.64  
Pelindung Katodik pada Instalasi Air Pendingin

Persoalan proteksi katodik juga timbul pada instalasi pemasukan air pendingin (*water intake*) PLTU maupun PLTD dan juga di dermaga tempat pembongkaran bahan bakar.

Pada pipa yang panjang dan ditanam dalam tanah serta mengalirkan air masalah efek elektrolisis seperti tersebut diatas bisa juga terjadi, mengingat suhu dan situasi kimia di sepanjang pipa tidak sama sehingga bisa timbul beda potensial listrik antara bagian-bagian pipa.

P adalah pelat pelindung katodik. Suhu  $t_2 > t_1$  dapat terjadi apabila aliran air pendingin atau karena posisi tiang yang berbeda terhadap sinar matahari.

### M. Pemadam Kebakaran

Bahaya kebakaran pada pusat-pusat listrik termis relatif besar, karena adanya bahan bakar dalam jumlah besar yang mudah terbakar. Kebakaran pada dasarnya adalah suatu reaksi kimia dengan oksigen ( $O_2$ ).

Kebakaran hanya bisa terjadi kalau:

1. Ada bahan yang bisa terbakar (*fuel*)
2. Tercapai suhu yang cukup tinggi, yaitu suhu titik nyala dari bahan yang akan terbakar (*ignition source*).
3. Ada oksigen yang cukup untuk terjadinya kebakaran (*oxygen*).

Untuk mencegah terjadinya kebakaran, maka tiga unsur tersebut di atas (yang sering disebut "segitiga bahaya" (*hazard triangle*)) harus dicegah agar tidak timbul secara bersamaan.

Apabila sampai terjadi kebakaran, maka alat pemadam kebakaran umumnya berfungsi menghilangkan unsur **b** dan unsur **c**. Menghilangkan unsur **b**, yaitu suhu yang tinggi, dilakukan dengan cara menyemprotkan air.

Sedangkan untuk menghilangkan oksigen, dapat dilakukan dengan cara, menyemprotkan serbuk kimia yang akan mengisolir (mengurung) api terhadap oksigen, atau dapat juga dilakukan dengan menyemprotkan gas  $CO_2$  untuk mengusir oksigen yang bertemu dengan api.

Pada pusat-pusat listrik, umumnya dipasang instalasi pemadam kebakaran yang akan menyemprotkan air atau menyemprotkan gas  $CO_2$ †

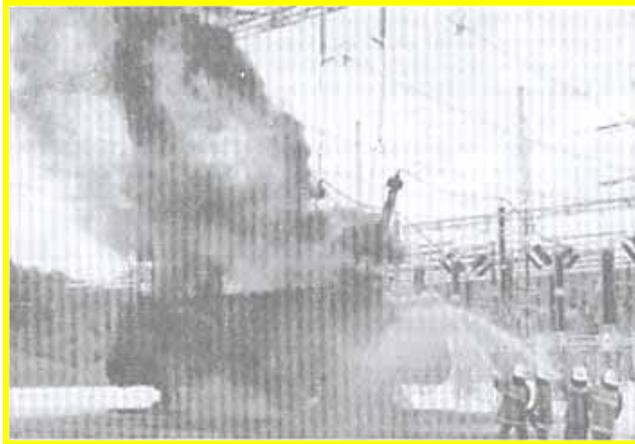
yang tergantung pada jenis bahan yang menimbulkan kebakaran. Apabila kebakaran ditimbulkan oleh cairan yang mudah terbakar (bensin, minyak, dan lain-lain).

Air tidak dapat digunakan karena pembanjiran tempat kebakaran dengan air akan menyebarkan cairan yang sedang terbakar tersebut sehingga api makin meluas.

Bentuk kebakaran seperti ini (kebakaran kelas B) yang terbaik adalah pemadam kimiawi kering (bubuk) disusul oleh CO<sub>2</sub>. Apabila kebakaran terjadi pada bagian-bagian listrik yang bertegangan (kebakaran kelas Q) air tidak juga dapat digunakan karena air dapat menghantar listrik; pada keadaan ini pun CO<sub>2</sub> dan pemadam kimiawi kering (bubuk) adalah pemadam yang terbaik. Untuk kedua jenis kebakaran ini, pemadam kimiawi kering (bubuk) adalah yang terbaik karena di samping menyelungkupi nyala api agar tidak berkontak dengan oksigen udara; penyelungkupan ini juga melindungi petugas pemadam dari radiasi panas nyala api.

Melakukan langkah-langkah untuk mencegah kebakaran adalah lebih baik daripada memadamkan kebakaran yang sudah terjadi. Langkah-langkah pencegahan ini antara, lain adalah:

1. Menjauhkan bahan yang mudah terbakar, misalnya bahan bakar dari suhu yang tinggi. Tangki bahan bakar minyak atau minyak pelumas, terutama apabila ditaruh di tempat yang tinggi harus diperhatikan agar bocorannya atau luapannya tidak menyentuh atau mengenai sesuatu yang bersuhu tinggi, misalnya pipa gas buang atau pipa uap.
2. Timbunan batu bara harus secara teratur dibalik dan disemprot air untuk mencegah terjadinya penyalaan sendiri (*self ignition*).
3. Dilarang keras merokok di sekitar instalasi bahan bakar, terutama instalasi bahan bakar gas.
4. Kontak-kontak dan sambungan listrik harus tertutup rapat pada instalasi bahan bakar.



Gambar III.65

Transformator yang sedang mengalami kebakaran dan sedang diusahakan untuk dipadamkan dengan menggunakan air

5. Dilarang keras melakukan pekerjaan las pada instalasi bahan bakar yang belum dikosongkan.
6. Instalasi bahan bakar harus dilindungi terhadap sambaran petir.
7. Alat-alat proteksi dari instalasi listrik perlu diuji secara periodik agar pasti berfungsi apabila terjadi gangguan hubung singkat sehingga tidak timbul kebakaran.

Personil pusat listrik harus secara periodik dilatih memadamkan kebakaran sehingga jika sampai terjadi kebakaran, kebakaran tersebut dapat segera dipadamkan.

Alat-alat pendeteksi terjadinya kebakaran harus diuji secara periodik sehingga terjadinya kebakaran dapat diketahui sedini mungkin.

Selain instalasi pemadam kebakaran yang terpasang pada bangunan, harus tersedia pula alat-alat pemadam kebakaran yang *mobile* yang dapat dipindahkan ke tempat yang memerlukannya setiap saat.

## **N. Beberapa Spesifikasi Bahan Bakar**

Selain *calorific value* (nilai kalori), masih ada lagi beberapa spesifikasi bahan bakar terutama bahan bakar minyak (BBM) yang sering diperlukan dalam praktik. Spesifikasi ini antara lain:

### 1. Viskositas (*viscosity*)

Viskositas kinematik BBM (cairan) menggambarkan kekentalan BBM dan hal ini berkaitan dengan tahanan yang dialaminya apabila mengalir melalui pipa atau lubang kecil. Sebagai contoh pemakaian BBM *marine fuel oil* (MFO) memerlukan pemanasan terlebih dahulu untuk mengurangi viskositas kinematiknya sebelum bisa digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel agar tidak menyumbat pengabut mesin diesel bersangkut.

Viskositas dinamik BBM adalah viskositas kinematik kali massa jenis BBM. Viskositas kinematik diukur dalam *Stokes* (St), sedangkan viskositas dinamik diukur dalam *Poise* (P). Sering digunakan centistokes (cSt) = 1072 Stokes.

### 2. Titik Tuang (*Pour Point*)

Titik tuang minyak (cairan) adalah suhu terendah di mana, minyak masih dapat dituang. Hal ini diperlukan di daerah beriklim dingin dalam kaitan dengan keperluan menuang BBM atau pelumas di mana satuannya adalah dalam derajat ( $^{\circ}\text{C}$ ) Celcius atau, derajat ( $^{\circ}\text{F}$ ) Fahrenheit.

### 3. Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala adalah suhu terendah minyak harus dipanaskan agar menghasilkan uap secukupnya untuk bercampur dengan udara dan dapat menyala (*flamable*) bila dilewati angka api kecil. Satuannya adalah derajat ( $^{\circ}\text{C}$ ) Celcius atau, derajat ( $^{\circ}\text{F}$ ) Fahrenheit.

### 4. Titik Bakar (*Ignition Point*)

Titik bakar adalah suhu terendah di mana pada kondisi cukup oksigen, pembakaran spontan terjadi. satuan titik bakar adalah derajat ( $^{\circ}\text{C}$ ) Celcius atau derajat ( $^{\circ}\text{F}$ ) Fahrenheit.

Titik bakar minyak baik BBM maupun minyak perlu diperhatikan dalam kaitannya dengan suhu, ruangan tempat penyimpanannya. Apabila suhu ruangan penyimpanan mencapai titik bakarnya, maka minyak yang disimpan tersebut akan menyala sendiri dan menimbulkan kebakaran.

Kebakaran-kebakaran yang terjadi di pusat listrik, antara lain disebabkan oleh adanya minyak pelumas atau BBM yang bocor atau meluap dari tangkinya, kemudian mengenai asbes isolasi pembalut pipa gas buang PLTD atau pipa uap PLTU yang suhunya mencapai titik bakar minyak yang mengenyainya sehingga minyak tersebut menyala sendiri dan menimbulkan kebakaran dalam pusat listrik.

Titik bakar batubara lebih tinggi dari pada titik bakar BBM. Oleh karena itu, *start* pembangkit listrik dilakukan dengan menggunakan BBM karena suhu ruang bakar masih rendah.

### 5. Titik Api (*Fire Point*)

Titik api adalah suhu terendah minyak yang harus dipanaskan untuk menghasilkan uap secukupnya agar bercampur dengan udara dan dapat terbakar selama paling sedikit 5 detik.

Satuan titik api adalah derajat ( $^{\circ}\text{C}$ ) Celcius atau, derajat ( $^{\circ}\text{F}$ ) Fahrenheit.

Suhu ini juga perlu diperhatikan seperti halnya titik bakar, walaupun penyalaan minyak yang terjadi belum stabil, paling sedikit 5 detik, tetapi hal ini sudah membahayakan.

### 6. Angka Oktan (*Octane Number*)

Angka oktan adalah angka yang menggambarkan banyaknya dalam persentase (%) volume isooctane dalam campuran yang terdiri dari isooctane dan n-heptane yang tidak menimbulkan letupan (*knock*) pada minyak bakar yang diuji dalam ruang kompresi sebuah silinder motor bakar.

Satuan angka oktan adalah persen (%). Angka oktan = 70 berarti pada bahan bakar yang mempunyai angka oktan ini 70 % volumenya adalah isooctane dan 30 % volumenya adalah n-heptane. Angka oktan beberapa BBM adalah:

Bensin 80-85 Premium 95-98 Super 99-100

Makin tinggi angka oktannya, maka makin tinggi perbandingan kompresi silinder motor bakar yang bisa digunakan.

Dari tinjauan termodinamika, makin tinggi perbandingan kompresi yang digunakan, makin efisiensi motor bakar yang didapat.

Pada motor bensin, penyalaan kabut BBM dalam silinder dilakukan menggunakan busur listrik dari busi sehingga dapat digunakan bahan bakar dengan angka oktan tinggi yang tidak akan menyala sebelum ada loncatan busur listrik dari busi. Pada motor diesel bahan bakar diharapkan agar menyala sendiri (tanpa busur listrik dari busi) saat mencapai akhir langkah kompresi. Oleh karena itu, dapat digunakan BBM yang lebih murah daripada BBM motor bensin.

### 7. Uji Ketergilingan (*Grindability Test*)

Uji ketergilingan adalah pengujian untuk menentukan tingkat ketergilingan relatif atau kemudahan menghancurkan batubara yang sedang diuji dengan membandingkannya terhadap batubara standar.

Hasil dari uji ketergilingan ini menggambarkan tingkat kekerasan batubara yang diperlukan untuk membuat desain mesin giling batubara, pada PLTU.

### O. Latihan

Latihan

1. Operasikan genset yang ada di bengkel atau laboratorium yang ada di sekolah anda dengan bimbingan guru dan teknisi. Amati perubahan tegangan jika putaran pada genset dinaikkan pada genset tidak dibebani, dibebani setengah dan beban penuh. Amati apa yang terjadi pada putaran genset.
2. Lepas *excitasi* pada generator, kemudian jalankan genset, lakukan pengukuran dan amati besar tegangan yang dibangkitkan Genset.
3. Bagaimana kondisi Genset di sekolah anda, apakah terawat dengan baik? Jika perawatannya kurang baik lakukan perawatan dengan didampingi guru dan teknisi

### P. Tugas

Buat laporan hasil latihan anda di laboratorium dan diskusikan dengan didampingi oleh guru

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Abdul Kadir, 1998. Transmisi Tenaga Listrik. Universitas Indonesia, Jakarta
- Andriyanto, 2003. Pengoperasian Generator STF 100 kVA Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik. Laporan PI. Teknik Elektro FT Unesa, Surabaya
- Davit Setyabudi, 2006. Transformator Tenaga. Laporan PI. Teknik Elektro FT Unesa, Surabaya
- Djiteng Marsudi, 2005. Pembangkitan Energi Listrik. Erlangga, Surabaya
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Pengenalan Pemeliharaan Mesin Pembangkit. PT PLN Persero Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Penanganan Bahan Bakar. PT PLN Persero Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Alat Bantu Mesin Pembangkit PT. PLN Persero. Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Pemeliharaan Mesin Pembangkit. Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Keselamatan Kerja dan Penanggulangan Kebakaran. Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Kerja Mesin Pembangkit PLTU. Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003
- Diklat Pembidangan Teknik SLTA. Kerja Mesin Pembangkit PLTA. Unit Pendidikan dan Pelatihan, Suralaya. 2003

Ermanto, Petunjuk Operasi PLTU Sektor Perak Unit III & IV Bidang Turbin. Tim Alih Bahasa. Perusahaan Umum Listrik Negara Pembangkitan dan Penyaluran Jawa Bagian Timur Sektor Perak.

*GBC Measurement, Protective Relay Application Guide, the General Electric Company.* Stafford England, 1987

Hedore Wildi, 2002. *Electrical Machines & Power System.* Prentice Hall, New Jersey

<http://faizal.web.id/sky/tutorial/energi-alternatif-dari-qunung-halimun/>

<http://www.blogberita.com>

<http://www.ekaristi.org>

<http://www.firstelectricmotor.com>

<http://www.harianbatampos.com>

<http://www.indonesiapower.co.id/Profil/UnitBisnis/tabid/66/Default.aspx>

<http://www.motor-rundirect.com>

<http://www.sitohangdaribintan.blogspot.com>

[http://members.bumn-ri.com/jasa\\_tirta1/graphics.html](http://members.bumn-ri.com/jasa_tirta1/graphics.html)

<http://www.gtkabel.com/>

Jan Machrowski, et.al. 1996. *Power System Dynamic and Stability.* New York, Singapore Toronto

Joel Weisman, et.al. 1985. *Modern Power and Planning System.* Printed in the United States of America, America.

Joko, 2004. *Pemeliharaan dan Perbaikan Mesin-Mesin Listrik (Paket Belajar Bercorak Kewirausahaan.* Teknik Elektro FT Unesa Surabaya, Surabaya

IEC 156/1963, *Method for the Determination of Electric Strength of Insulating oils.* 1963

IEC 76/1976. *Power Transformer*. 1976

Indrati Agustinah, Joko, 2000. Pemeliharaan dan Perbaikan Transformator (Paket Belajar Bernuansa Kewirausahaan). Teknik Elektro FT Unesa Surabaya, Surabaya

Kurikulum SMK Tahun 2004. Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan, Jakarta. 2004

Kursus Pengoperasian Sistem Penunjang (*Demin Plant*) (L.KUG/M.OUI.803 (1) A). PT. PLN (Persero) Unit Pendidikan dan Pelatihan Surabaya. 2004

Laporan *On Site Training* Prajabatan SLTA & D3 PLTU III/IV Perak Surabaya. Sistem Kelistrikan (L.KKG/M.OUI.201 (1) A). PT. Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Priok Jakarta, 2005

M. Azwar Charis, 2006. Membelit Ulang motor Kompresor Tiga Fasa Putaran 1500 RPM. Laporan PI. Teknik Elektro, FT Unesa, Surabaya

MS. Nurdin. V. Kamuraju, 2004. *High Voltage Engineering*. Printed in Singapore

P.T. Bambang Djaya. Metode Pengujian Transformator Distribusi. P.T. Bambang Djaya, Surabaya 1995.

P.T. PLN. Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan untuk Transformator Tenaga. Perusahaan Umum Listrik Negara, Jakarta 1981

Rachma Dewi O. 2006. Observasi Pembuatan *Engine Panel Trapezium Selenoid Off* Untuk *Generating Set F 3L 912-STF 25 kVA (20 kW)* di PT. Conductorjasa Suryapersada. Laporan PI. Teknik Elektro FT Unesa, Surabaya

Rahmat R. Hakim, 2006. Prosedur Umum Perbaikan Motor 3 Fasa di PT ABB Sakti Industri Surabaya. Laporan PI. Teknik Elektro, FT Unesa, Surabaya

SPLN 17: 1979. Pedoman Pembebanan Transformator Terendam Minyak. Jakarta, 1979.

SPLN 50 – 1982. Pengujian Transformator. Jakarta, 1982.

*Standart Operational Procedure (SOP) Start-Stop Unit III & IV Unit Pembangkitan Perak. PT. PJB I Unit Pembangkitan Perak dan Grati, Surabaya. 1998*

Standar Kompetensi Nasional. Bidang Inspeksi Pembangkitan Tenaga Listrik. Depdiknas RI, Direktorat Jendral Pendidikan Dasar dan Menengah Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan, Jakarta. 2003

Turan, G. 1987. *Modern Power System Analysis*. John Wiley & Sons

Yudi Widya N, 2006. Sistem Pembangkit Tenaga Air (PLTA) Mendalan di PT. PJB Pembangkitan Brantas Distrik D PLTA Mendalan. Laporan PI. Teknik Elektro FT Unesa, Surabaya

Yugo F. 2006. Sistem Pengoperasian Genset di PT. Bayu Bangun Lestari Plasa Surabaya. Laporan PI. Teknik Elektro FT Unesa, Surabaya

Copyright 2003. *Japan AE Power Systems Corporation*. All Rights Reserved.

## DAFTAR ISTILAH

- absorben*, 95  
*accu battery*, 396  
*accu zuur*, 81  
*aero derivative*, 183  
*agregat dan piranti*, 363  
*air gap*, 115  
*alarm*, 123  
alat ukur digital, 564  
*ambient temperature*, 143  
*amperemeter*, 541, 547  
*amplifier mekanis*, 143  
*AMSSB*, 119  
angka oktan, 223  
*antene*, 540  
arus hubung singkat, 122  
arus *line*, 544  
arus keluar ke *line*, 353  
arus pengisian, 351  
asam sulfat ( $H_2SO_4$ ), 79  
*assembling*, 312  
*automatic follower*, 486  
*auxiliary transformer*, 180, 401  
avometer, 576  
AVR, 37, 482  
baterai aki, 76, 338  
baterai akumulator, 349  
baterai *buffer*, 359  
beban harian, 5  
beban puncak, 5  
beban rata-rata, 2  
beban tahunan, 5  
belitan, 518  
belitan primer, 546  
belitan skunder, 546  
biaya produksi, 5  
*black start*, 157  
*bleaching earth*, 96  
*blow down* (air ketel), 17, 147  
*boiler*, 412  
*breakdown voltage*, 99  
*buffer baterey*, 348  
*bushing*, 84, 85, 528  
busur listrik, 64  
*cable duct*, 27  
*carrier current*, 501  
*cathodic protection*, 226  
*cd (cadmium)*, 78, 79  
*cellars*, 193  
*centrifuge reclaiming*, 94  
*chosphimeter*, 555  
*circuit breaker*, 52  
*circulating water pump*, 401  
*compression joint*, 129  
*condition based maintenance*, 391  
*consumable parts*, 272  
*control room*, 144  
*cos  $\phi$* , 552  
*coupling capacitor*, 529  
*coupling system*, 524  
*crane*, 5, 492  
*ct/ppt avr*, 37  
*current compensator*, 481  
*data acquisition*, 142  
daya, 2  
daya aktif, 109  
daya reaktif, 110  
dB, 530  
*deaerator*, 175  
debit air, 13  
*deenergized*, 96  
dekarbonator, 179  
*delta-delta*, 85  
delta-bintang, 88  
*delta-wye*, 88  
diagram AVR, 488  
diagram beban, 2  
diagram *excitacy*, 487  
*dinamo exciler*, 39  
*disconnecting switch*, 27  
*distribution planning*, 7  
dokumen sop, 402  
*dual slope*, 567

- duga muka air (DMA), 159  
*economizer*, 174, 163  
elektroda, 87  
*elevator*, 512  
energi listrik, 5  
energi mekanik, 4  
energi primer, 5, 16  
*exitacy*, 94, 458  
*feeder* (saluran), 15  
faktor beban, 2, 244  
faktor daya, 551  
faktor disipasi, 97  
faktor kapasitas, 245  
faktor *utilisasi*, 246  
*field circuit breaker*, 480  
*fire*, 93,233  
*filtering*, 95  
*flashover*, 115  
frekuensi, 24, 110  
frekuensi getar, 557  
frekuensi lidah bergetar, 556  
frekuensi meter, 556  
*flused stem system*, 197  
*forced outage rate (for)*, 246  
*fuel cell*, 213  
gangguan belitan kutub, 371  
gangguan dan kerusakan, 19  
gangguan elektrik generator, 370  
gangguan mekanis generator, 364  
gangguan, pemeliharaan dan perbaikan generator sinkron, 285  
gangguan, pemeliharaan dan perbaikan motor asinkron, 288  
gangguan pada mesin *dc*, 364  
gelombang mikro, 553  
*generation planning*, 5  
generator, 350  
generator asinkron, 133  
generator arus searah shunt, 37  
generator *buffer*, 360  
generator *dc*, 29  
generator *dc* dengan 2 kutub, 40  
generator *dc* shunt 4 kutub, 40  
generator *dc* tidak keluar tegangan, 364  
generator listrik, 1  
generator *main excitacy*, 38  
generator penguat pilot, 29  
generator penguat utama, 29  
generator sinkron, 3, 28, 133, 282,  
generator sinkron 3 fasa, 27, 28,  
generator terbakar, 277  
gerbang *AND*, 428  
gerbang *NOT*, 429  
gerbang *OR*, 428,  
*geothermal*, 189  
*glowler*, 373  
*grindability test*, 234  
*ground*, 546  
*grounding mesh*, 137  
*grounding plate*, 137  
*hand wheel (shunt regullar)*, 37  
harmonisa, 24  
*hazard triangle*, 229  
*heat exchanger*, 18  
*heat recovery steam generator*, 184  
*heat shrink*, 184  
hubungan jajar baterai akumulator dan generator sunt, 350  
*hygroscopicity*, 95  
instalasi arus searah, 5  
instalasi bahan bakar, 5  
instalasi baterai aki, 5  
instalasi *lift/elevator*, 512  
instalasi pemakain sendiri, 75  
instalasi pendingin, 5  
instalasi penerangan, 5  
instalasi tegangan tinggi, 5  
instalasi tegangan rendah, 5  
instalasi telekomunikasi, 119  
instalasi sumber energi, 5  
interferensi, 523  
interkoneksi, 6  
*insulating switch*, 50  
*investasi*, 5  
jenis saklar tenaga, 49  
*juster werstand*, 37  
*jointing sleeve*, 128  
kapasitor penguat, 529  
kendalan pembangkit, 248  
kebenaran *AND*, 427  
kebenaran *OR*, 428  
kedip tegangan, 24  
kegiatan pemeliharaan, 396  
kemiringan tegangan, 24  
klasifikasi transformator tenaga, 450  
kendala operasi, 227  
kerja paralel transformator. 432

- keselamatan kerja, 398, 444, 465  
kilo Watt jam, 513  
koh (potas kostik), 79  
komunikasi gelombang mikro, 536  
komunikasi dengan kawat, 523  
komunikasi dengan pembawa saluran tenaga, 524  
komunikasi untuk administratif, 523  
komunikasi untuk pembagian beban, 522  
komunikasi untuk pemeliharaan, 522  
komunikasi radio, 531  
komunikasi gelombang mikro, 532  
konsumen, 1  
konstruksi jaringan distribusi, 7  
konversi energi primer, 4  
koordinasi pemeliharaan, 242, 236  
kualitas tenaga listrik, 1  
kumparan silang, 554  
KWH meter, 23  
K3, 249  
lama pemakaian, 2  
laporan kerusakan, 274  
laporan pemeliharaan, 272  
laporan dan analisis gangguan, 279  
lebar pulsa, 567  
*lighting arrester*, 116  
*line*, 88  
*line trap*, 511  
*lift*, 512  
*limited circuit*, 484  
*line matching unit*, 119  
*load forecast*, 5  
*loss of load probability (LOLP)*, 249  
*magnetic circuit breaker (MCB)*, 63  
*main generator*, 394  
*main exciter*, 37, 393  
*maintenance*, 391  
manajemen operasi, 266  
manajemen pemeliharaan, 268  
medan magnet, 63  
*megger*, 575  
mekanisme pemutus tenaga, 72  
membelit motor listrik, 306  
mencari kerusakan generator sinkron, 283  
menentukan letak kerusakan motor *dc*, 386  
mesin *diesel*, 193  
metode integrasi, 565  
metode perbandingan, 565  
mika saklar, 354  
minyak transformator, 464  
modulasi lebar pulsa, 549  
motor *area*, 508  
motor *dahlander*, 492  
motor listrik, 433  
motor listrik bantu, 394  
motor listrik terbakar, 278  
motor tidak mau berputar, 382  
motor terlalu cepar putarannya, 384  
*multiple grounding rod*, 137  
mutu tenaga listrik, 21  
NiOH (nikel oksihidrat), 79  
*ohmsaklar*, 351  
*off delay*, 429  
*on delay*, 429  
*operator system*, 105  
*operation planning*, 7  
operasi, 17  
operasi unit pembangkit, 236  
*opjager*, 357  
*oscilloscope*, 571  
otomatisasi, 261  
*output pilot exciter*, 36  
*output*, 36  
*over circuit breaker*, 394  
*over heating*, 276  
*partial discharge*, 271  
pemadam kebakaran, 229  
pembangkitan tenaga listrik, 1  
pembebasan tegangan, 252  
pembumian, 105  
pemeliharaan alat ukur, 576  
pemeliharaan *crane dan lift*, 518  
pemeliharaan dan sop, 427  
pemeliharaan bulanan, 391  
pemeliharaan alat komunikasi pada pusat pembangkit, 539

- pemeliharaan generator dan *governor*, 393  
pemeliharaan harian, 391  
*pemeliharaan instalasi pada pusat pembangkit listrik*, 126  
pemeliharaan mingguan, 391,  
pemeliharaan periodik, 268, 392  
pemeliharaan pada plta, 393  
pemeliharaan pmt, 474  
pemeliharaan PLTU, 170  
pemeliharaan rutin, 391  
pemeliharaan sistem kontrol, 488  
pemeliharaan sumber dc, 347  
pemeliharaan transformator, 395, 459  
pemeliharaan triwulan, 392  
pemeriksaan transformator, 101  
pemetan (*plotting*), 569  
pemindahan beban, 256  
pemutus beban (PMB), 50  
pemutus tenaga (PMT), 47, 474  
pemutus tenaga meledak, 279  
pemutus tenaga, 432  
pencatat langsung, 570  
pengatur fasa, 562  
pengereman dinamik, 504  
pengereman mekanik, 507  
pengereman motor, 507  
pengereman *plug*, 503  
pengereman *regeneratif*, 506  
penggerak mula, 1  
penghubung, 432  
pengujian transformator, 459  
pengukuran, 546  
pengukur energi, 560  
pengukuran daya listrik, 548  
pengukuran faktor daya, 551  
pengukuran frekuensi, 557  
pengukuran tegangan tinggi, 545  
penulisan pena, 568  
penunjuk (*register*), 564  
penyaluran tenaga listrik, 21  
penyaring pengait, 529  
penyediaan tenaga listrik, 1  
peramalan beban, 9  
perbaikan dan perawatan genset, 443  
perbaikan generator sinkron, 282  
peredam reaktansi, 575  
perencanaan distribusi, 7  
perencanaan subtransmisi, 7  
*performance test*, 391  
perkiraan beban, 5, 236  
perubahan temperatur, 398  
*pilot exciter*, 37, 393  
*piston ring*, 18  
*plate tectonic*, 190  
PLTA, 1, 11, 78, 145  
PLTD, 11, 78, 198  
PLTG, 11, 180  
PLTGU, 184  
PLTN, 1, 14, 208  
PLTP, 1, 11, 189  
PLTU, 3, 160  
PMT gas SF<sub>6</sub>, 63  
PMT medan magnet, 63  
PMT *vacuum*, 57  
PMS (Saklar pemisah), 50  
penyimpanan alat ukur, 578  
potensiometer, 106, 567  
*power generator*, 4  
*power line carrier (PLC)*, 119, 522  
*power plant*, 8  
*power network analyzer*, 23, 24  
*predictive maintenance*, 180  
*primer proteksi*, 341  
primover, 1, 4  
prinsip kerja alat ukur, 560  
*program automatic control*, 142  
pusat listrik tenaga *thermo*, 3, 11  
pusat listrik tenaga *hydro*, 3, 12  
putaran motor terbalik, 385  
radiator, 17  
rangkaiannya transmisi suara, 529  
*recorder*, 568  
*region*, 238  
rel (*busbar*), 15, 43  
rel ganda, 44  
rel tunggal, 43  
relai hubung tanah, 113  
relai diferensial, 112  
relai proteksi, 110, 477  
*repetitive*, 572  
*rotating rectifier*, 480  
*rotor turbogenerator*, 30  
*run off river*, 147  
sutm, 259  
saklar, 49

- saklar pemisah (PMS), 49  
saluran jebakan, 529  
saluran kabel, 48  
*scada*, 119  
sentral telepon, 347  
*sensing circuit*, 482  
sel berbentuk lurus, 348  
*solenoid*, 508  
*shut down unit*, 422  
*sistem distribusi*, 10  
*signal generator*, 574  
*sincronizing circuit*, 484  
simbol gerbang AND, 429  
simbol gerbang OR, 429  
*single grounding rod*, 137  
sistem *excitacy*, 106, 478  
sistem *excitacy* dengan sikat, 478  
sistem *excitacy* tanpa sikat, 479  
sistem interkoneksi, 20, 235  
sistem pengukuran, 109  
sistem proteksi, 110  
sistem yang terisolir, 235  
*sop blower*, 273  
*sop operator boiler lokal*, 426  
*sop* sistem kelistrikan, 428  
*stator pilot exciter*, 37  
start nor mal stop, 400  
*storage*, 573  
suku cadang, 272  
*super heater*, 150  
*switchgear*, 72, 466  
*switching*, 102, 256  
*system grid operation*, 8  
*system logic*, 427  
*system logic and wiring diagram*, 427  
*system planning*, 5  
tabel kebenaran, 427  
tahanan geser, 36  
tahanan isolasi, 393, 395  
tegangan line, 545  
perkembangan teknologi  
pembangkitan, 20  
telekomunikasi, 552  
telekomunikasi melalui kawat, 523  
*thermal siphon filter*, 96  
*threshold values*, 142  
*thyristor circuit*, 485  
*time based maintenance*, 391  
*timer*, 429  
*top overhaul*, 269  
transformator, 81  
transformator arus, 541  
transformator rusak, 278,  
transformator tegangan, 546  
transformator tenaga, 450  
transformator toroida, 545  
transformator 3 fasa, 27  
transmisi, 6, 545  
*transmission planning*, 6  
*trichloroethylene*, 100  
turbin *pelton*, 154  
turbin *crossflow*, 225  
turbin air, 4,5  
*trip coil*, 74  
turbin *francis*, 151  
turbin gas 4,5  
*turning gear*, 412,, 425  
turbin *kaplan*, 152  
turbin uap, 4, 5  
*turbocharger*, 203  
*turning type*, 524  
*ultra-high frequency (UHF)*, 493  
*unit avr*, 482  
*unit tyristor*, 485  
urutan kerja dan tanggungjawab,  
403  
*type brushlees exiter system*, 35  
*type rasio*, 558  
*vacuum interrupter (VI)*, 446  
viskositas, 93  
*voltage adjuster*, 481  
voltmeter digital, 565  
VVA, 37  
*waduk*, 159  
wattmeter, 503  
wattmeter 1 fasa, 548, 549  
wattmeter 1 fasa dan 3 fasa, 548  
wattmeter 3 fasa, 550  
*wiring diagram*, 429

## DAFTAR TABEL

	H a l	
II.1	Komponen dan Cara Pemeriksaan Transformator Tenaga	101
II.2	Tahanan Jenis Berbagai Macam Tanah Serta Tahanan Pentanahan	139
III.1	Klasifikasi Serta Data Batu	216
III.2	Data Teknis Bahan Bakar Minyak	217
III.3	Struktur Molekul <i>Hydrocarbon Aliphatic</i>	222
III.4	Komposisi BBM Diesel Produk Soviet	222
III.5	Hubungan Tekanan Uap dengan Suhu	224
III.6	Komposisi Gas Alam dari Berbagai Tempat	225
IV.1	Neraca Daya Sistem	244
IV.2	Neraca Energi Sistem	248
VI.1	Standar Kebutuhan Hantaran, Pengaman Lebur, dan Diameter Pipa untuk Penyambungan Motor Induksi	298
VI.2	Standart Kabel dengan Isolasi Karet dalam Pipa sesuai <i>Standart American Wire Gauge</i>	299
VI.3	Pemakaian Arus dan Tegangan pada Motor DC dan Motor AC 3 Phasa menurut AEG	300
VI.4	Format dan Data Fisik yang Dicatat Pada Proses Penerimaan	310
VI.5	Hasil Inspeksi Kelistrikan	311
VI.6	<i>Dismanting</i> Data	312
VI.7	<i>Striping</i> Data	321
VI.8	Format Data Hasil Pengukuran dan Tes Running	336
VI.9	Format Proses Pencatatan Tes Kelistrikan	337
VI.10	Laporan Tes Kelistrikan Inti Stator	338
VI.11	Laporan Waktu & Kinerja Karyawan	339
VI.12	Laporan Inspeksi	340
VI.13	Daftar Diameter, Penampang, Berat dalam kg/km, dan Besarnya Nilai Tahanan pada Suhu 15 <sup>0</sup> C Ohm/km	341
VIII.1	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi pada <i>Pilot Exciter</i> Unit I	393
VIII.2	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi pada <i>Main Exciter</i> Unit I	393
VIII.3	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi pada <i>Main Generator Unit</i> I	394
VIII.4	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi Pada Motor Listrik Bantu Unit I	394
VIII.5	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi Pada OCB Generator 6 kV Unit I	395

VIII.6	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi Transformator I (6/70 kV)	395
VIII.7	Contoh Hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi pada OCB Transformator 70 kV	396
VIII.8	Contoh hasil Pengukuran Besar Nilai Tahanan Isolasi Pada OCB Generator 6 kV	396
VIII.9	Contoh Hasil Pemeliharaan Accu	398
IX.1	Istilah-Istilah yang ada Pada SOP PLTU Perak	401
IX.2	Format Pengesahan Dokumen	402
IX.3	Daftar Dokumen Terkait	405
IX.4	Daftar Penerimaan Awal Dokumen Terkendali	406
IX.5	Daftar Perubahan Dokumen	408
IX.6	Daftar Induk Perubahan Dokumen	409
IX.7	Lembar Tanda Terima Dokumen	410
IX.8	Bagan Alir Dokumen Mutu	411
IX.9	Kebenaran "AND"	427
IX.10	Kebenaran "OR"	428
IX.11	Kebenaran "NOT"	428
IX.12	Data Transformator	439
IX.13	Pengaturan <i>Tap Changer</i> Trafo Daya	439
IX.14	Instruksi Kerja Pemeliharaan Genset	446
X.1	Tabel Spesifikasi Minyak Transformator Baru	453
X.2	Tabel Spesifikasi Minyak Transformator Bekas	454
XI.1	Momen Inersi Gerak dan Putaran	502
XII.1	Karakteristik dan Struktural Kabel Telekomunikasi	526
XII.2	Komunikasi dengan Pembawa Saluran Tenaga	527
XII.3	Struktur Kabel Koaksial Frekuensi Tinggi untuk Pembawa (PLC)	527
XII.4	Contoh Spesifikasi Peralatan Pembawa Saluran Tenaga (PLC)	531
XII.5	Contoh Spesifikasi Peralatan Komunikasi Radio	533

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman	
I.1	Diagram Proses Pembangkitan Tenaga Listrik	2
I.2	Contoh Diagram Beban Listrik Harian	3
I.3	Contoh <i>Power Generator Comercial</i> di India	4
I.4	Pengangkatan Transformator Menggunakan <i>Crane</i> Untuk Pengembangan Pusat Pembangkit Listrik	6
I.5	Contoh Konstruksi Transmisi	7
I.6	Contoh Konstruksi Jaringan Distribusi	7
I.7	Sistem <i>Grid Operation</i> pada <i>Power Plant</i>	8
I.8	Pembangunan PLTD yang Memperhatikan Lingkungan	9
I.9	Aktivitas yang Harus Dilakukan Pada Perencanaan Sistem Pembangkit Tenaga Listrik	9
I.10	Blok Diagram Proses Merencanakan Bentuk Sistem Distribusi	10
I.11	PLTA Mini <i>Hydro</i> Memanfaatkan Debit Air	12
I.12	Proses Penyaluran Air PLTA Mendalan Memanfaatkan Tinggi Jatuh Air	13
I.13	Diagram Satu Garis Instalasi Tenaga Listrik pada Pusat Pembangkit Listrik Sederhana	15
I.14	Sebagian dari Sistem Interkoneksi (Sebuah Pusat Pembangkit Listrik Dua Buah GI dan <i>Sub System</i> Distribusi)	21
I.15	Proses Penyediaan Tenaga Listrik (Pembangkitan dan Penyaluran)	22
I.16	Proses Penyediaan Tenaga Listrik Bagi Konsumen	23
I.17	<i>Power Nertweork Analiser Type Topas</i> 1000 Buatan LEM Belgia	24
II.1	Generator Sinkron 3 Fasa Pasa	25
II.2	Rangkaian Listrik Generator Sinkron 3 Fasa Hubungan Y	26
II.3	Kumparan Stator generator Sinkron ke Fasa Hubungan Y	26
II.4	Hubungan Klem Generator Sinkron 3 Fasa Hubungan Y	27
II.5	Diagram Hubungan Generator dan Transformator 3 Fasa	28
II.6	Prinsip Penguatan Pada Generator Sinkron 3 Fasa	28
II.7	Generator Sebuah PLTU Buatan Siemen dengan 2 Kutub	29
II.8	Rotor Turbo Generator Berkutub Dua	30
II.9	Rotor Generator PLTA Kota Panjang (Riau) Berkutub Banyak 57 MW	31
II.10	Stator dari Generator Sinkron	31
II.11	Diagram Generator Sinkron 500 MW Dengan Penguat Generator DC 2400 kW	32
II.12	Stator Generator Sinkron 3 Fasa 500 MVA, 15 kV, 200 RPM, 378 Slots	32
II.13	Stator Steam Turbin Generator Sinkron 722 MVA 3600 RPM 19kV	33
II.14	Rotor Generator 36 Kutub, Penguatan 2400 ADC Hasil Penyearahan Listrik 330 Volt AC	33

II.15	Belitan Rotor <i>Salient Pool</i> (Kutub Menonjol) Generator Sinkron 250 MVA	34
II.16	Generator Sinkron Rotor Sangkar Kutub Menonjol 12 Slot	34
II.17	Rotor 3 Phasa <i>Steam Turbine</i> Generator 1530 MVA, 1500 rpm, 27 kV, 50 Hz	35
II.18	Rotor Belit 4 Kutup, Penguatan 11,2 kA 600V DC Brushlees	35
II.19	<i>Type Brushlees Excitacy System</i>	36
II.20	Penguatan Generator Unit I PLTA Mendalan	37
II.21	Gambar pengawatan system penguatan generator unit I PLTA di Daerah Mendalan Sumber (PLTA Mendalan)	38
II.22	Prinsip Kerja AVR <i>Brown &amp; Cie</i>	39
II.23	Bagian–Bagian Generator DC dengan 2 Kutup	40
II.24	Generator DC Shunt 4 Kutup	40
II.25	Bagian–Bagian Generator DC 100 kW, 250V, 4 Kutup, 1275 rpm ( <i>Courtesy of Generator Electric Company USA</i> )	41
II.26	Generator DC 2 Kutup dengan Penguatan Tersendiri	41
II.27	a. Generator Shunt dengan Penguatan Sendiri	42
	b. Diagram Skema Generator Shunt	
II.28	a. Generator Kompon Panjang Berbeban	42
	b. Skema Diagram Generator Kompon	
	a. Generator Abad 20 Awal	
II.29	b. Generator Portable (Pandangan Samping)	43
	c. Generator Portable (Pandangan Sudut)	
II.30	Pusat Pembangkit Listrik dengan Rel Tunggal Menggunakan PMS Seksi	44
II.31	Pusat Pembangkit Listrik dengan Rel Ganda Menggunakan PMT Tunggal	45
II.32	Pusat Pembangkit Listrik dengan Rel Ganda Menggunakan Dua PMT (PMT Ganda)	46
II.33	Pusat Pembangkit Listrik dengan Rel Ganda Menggunakan PMT 1½	47
II.34	Saluran antara Generator dan Rel	48
II.35	Satu PMT dan Tiga PMS	51
II.36	Konstruksi Alat Pentahanan	51
II.37	Pemutus Tenaga dari Udara	52
II.38	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT Minyak Banyak Sederhana	52
II.39	Konstruksi Kontak-Kontak PMT Minyak Banyak Sederhana	53
II.40	PMT 150 kV Minyak Banyak di CB Sunyaragi	53
II.41	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT minyak Banyak	54
II.42	PMT Minyak Sedikit 70 kV	55
II.43	Konstruksi Ruang Pemadaman Pada PMT Minyak Sedikit Secara Umum	56
II.44	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT Minyak Sedikit Secara Sederhana	56
II.45	PMT SF <sub>6</sub> 500 kV Buatan BBC di PLN Sektor TET 500 kV Gandul	58
II.46	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT/S	58

II.47	Potongan PMT untuk Rel Berisolasi Gas SF <sub>6</sub> 72,5 –245 kV	59
II.48	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT SF <sub>6</sub> Secara Sederhana	59
II.49	PMT Vakum Buatan ABB Tipe VD4	60
II.50	Konstruksi dan Mekanisme PMT Vakum Buatan ABB Tipe VD4	60
II.51	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT Vakum Secara Umum	61
II.52	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT Vakum	61
II.53	Kontak PMT Vakum dengan Medan Magnit Radial	62
II.54	Kontak PMT Vakum dengan Medan Magnit Aksial	63
II.55	PMT Medan Magnit	63
II.56	PMT 500 kV Buatan BBC yang Dilengkapi Resistor	65
II.57	PMT 500 kV Buatan BBC Tanpa Dilengkapi Resistor	65
II.58	Konstruksi Ruang Pemadaman PMT Vakum Buatan Siemens	66
II.59	PMT Udara Hembus dengan Ruang Pemadaman Gas secara Keseluruhan	66
II.60	Hubungan Resistor dan Kapasitor dengan Kontak-Kontak Utama PMT Udara Tekan 500 kV Buatan BBC	67
II.61	Kondisi Kontak dari Sebuah Saklar Dalam Keadaan Tertutup (a), Mulai Membuka (b) dan (c) Sudah Terbuka Lebar	68
II.62	Penampung Udara, Ruang Pemutus, dan Katup Penghembus dari <i>Air Blast Circuit Breaker</i>	68
II.63	Contoh <i>Circuit Breaker</i> Tiga Phase 1200A 115 kV, Bill 550 kV ( <i>Courtesy of General Electric</i> )	69
II.64	<i>Circuit Breaker Oil minimum</i> untuk intalasi 420 kV, 50 Hz ( <i>Courtesy of ABB</i> )	69
II.65	<i>Air Blast Circuit Breaker</i> 2.000 A 362 kV ( <i>Courtesy of General Electric</i> )	70
II.66	<i>Switchgear High Density MV</i>	70
II.67	<i>Circuit Breaker Enclosed 15 Group Enclosed SF<sub>6</sub></i>	71
II.68	Vacum Circuit Beaker memiliki Rating 1200 A pada 25,8 kV Dapat Memotong Arus 25 kA Dalam 3 Siklus untuk Sistem 60 Hz ( <i>Courtesy of General Electric</i> )	71
II.69	<i>Hom-gap Disconnecting Switch</i> 1 kutup 3 phase 725 kV 60 Hz, kiri posisi terbuka dan kanan tertutup 10 siklus 1200 kA Bill 2200 kV ( <i>Courtesy of Kearney</i> )	72
II.70	Mekanisme Penggerak PMT Menggunakan Pegas dalam Keadaan Tertutup Dilihat dari Sisi Depan	73
II.71	Mekanisme Penggerak PMT yang Menggunakan Pegas Keadaan Terbuka Dilihat Dari Sisi Depan	73
II.72	Mekanisme Penggerak PMT Menggunakan Pegas Dilihat Dari Samping	75
II.73	a. Instalasi Pemakaian Sendiri Pusat Pembangkit Listrik Kapasitas di Bawah 5 MW	76
II.73	b. Instalasi Pusat Listrik Kapasitas 5 MW Sampai 15 MW	76
II.73	c. Instalasi Sendiri Pada Pusat Listrik dengan Kapasitas di Atas 15 MW	77
II.74	Instalasi Baterai dan Pengisiannya	78

II.75	Perubahan Kimia Selama Pengisian dan Pemakaian Aki	79
II.76	Grafik Kapasitas Aki	80
II.77	Macam - Macam Transformator Pada Unit Pembangkit Listrik	82
II.78	Transformator 2 Phase <i>Type</i> OA	82
II.79	Transformator 3 Phase <i>Type</i> 1000 MVA	83
II.80	Transformator 3 Phasa Transformator 4500 MVA yang Digunakan untuk Station Pembangkit Nuklir	83
II.81	Transformator Special pada Pembangkit Tenaga Panas Produksi ABB	84
II.82	Transformator 3 Phasa dengan Daya 36 MVA 13,38 kV	84
II.83	Transformator 3 Phasa Hubungan <i>Delta-Delta</i> yang Disusun dari 3 Buah Transformator Satu Phasa A,B, dan C Dihubungkan Pada Pembangkit Listrik	86
II.84	Diagram Hubungan <i>Delta-Delta</i> Transformator 3 Phasa Dihubungkan Pembangkit Listrik dan Beban ( <i>Load</i> )	87
II.85	Transformator 3 Phase Hubungan Delta – Bintang yang Disusun dari 3 Buah Transformator Satu Phasa	89
II.86	Skema Diagram Hubungan Delta-Bintang dan Diagram Phasor	89
II.87	Diagram Gambar Contoh Soal	90
II.88	Transformator 3 Phase Hubungan Bintang-Bintang	91
II.89	Transformator Hubungan Bintang-Bintang dengan Tersier	91
II.90	<i>Open Delta Connection</i>	92
II.91	Transformator Hubungan <i>Open Delta</i>	92
II.92	Susunan Elektroda Untuk Tegangan Searah	97
II.93	Jembatan <i>Schering</i> Untuk Mengukur Kapasitansi dan <i>Factor Disipasi</i>	98
II.94	Jembatan <i>Schering</i>	98
II.95	Pentanahan pada Transformator 3 Phasa	105
II.96	Petanahan pada Transformator 3 phasa	106
II.97	Pengaturan Tegangan Generator Utama dengan Potensiometer	106
II.98	Sistem <i>Excitacy</i> Tanpa Sikat	107
II.99	PMT Medan Penguat dengan Tahanan R	108
II.100	Pengukuran Daya Aktif Pada Rangkaian Tegangan Tinggi	110
II.101	Diagram Pengukuran pada Generator dan Saluran Keluar	111
II.102	Bagan Rangkaian Listrik untuk Sistem Proteksi	112
II.103	Konstruksi sebuah lightning arrester buatan Westinghouse yang menggunakan celah udara ( <i>air gap</i> ) di bagian atas	116
II.104	Lighting Arrester Tegangan Rendah Untuk Dipasang di Luar Gedung	116
II.105	Lighting Arrester Tegangan Rendah Untuk Dipasang di Dalam Gedung	117
II.106	Skematik Prinsip Kerja PLC	120
II.107	Diagram <i>Blok Remote Terminal Unit</i> (RTU)	121

II.108	Contoh dari Sebuah PLTU Berdiri Sendiri dengan 3 Unit	121
II.109	Pengawatan Skunder dari Suatu Penyulang (Saluran Keluar) yang Diproteksi oleh Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Hubung Tanah	123
II.110	Prinsip Kerja Kontak Reset	125
II.111	Berbagai Macam Kabel, Baik Untuk Penyalur Daya Maupun Untuk Pengawatan Skunder dan Kontrol	132
II.112	Diagram Satu Garis dari PLTGU, Turbin Gas Distart Oleh Generatornya yang Dijadikan Motor Start	134
II.113	Foto Dari Sebuah Alat Perekam Kerja (Untuk Pengujian) PMT Buatan <i>Euro SMC</i>	135
II.114	Data Hasil Pengujian Pemutusan Tenaga	135
II.115	Empat Alat Pentanahan	138
II.116	Batang Pentanahan Beserta Aksesorinya	138
II.117	Batang Petanahan dan Lingkaran Pengaruhnya	139
II.118	Cara Mengukur Tahanan Pentanahan	140
II.119	Penggunaan Transformator Arus Klem	140
II.120	Bagan Instalasi Pneumatik (Udara Tekan) Sebuah PLTD	141
II.121	<i>Amplifier Hidrolik</i>	142
II.122	Reservoir Minyak Bertekanan Untuk Sistem kontrol	143
II.123	Komponen Peralatan Untuk Pengaturan Hidrolik	144
III.1	Proses Konversi Energi Dalam Pusat Listrik Tenaga Air	145
III.2	Instalasi Tenaga Air PLTA Bila Dilihat Dari Atas	146
III.3	Prinsip Kerja PLTA <i>Run Off River</i>	148
III.4	Potongan Memanjang Pipa Pesat PLTA Sutami (PLTA dengan Kolam Tando Reservoir)	148
III.5	Bendungan II ETA Mrica di Jawa Tengah dengan kapasitas 3 x 60,3 MW, Bendungan Beserta Pelimpasannya (Sisi Kiri) dan Gedung PLTA Beserta Air Keluarnya (Sisi Kanan).	149
III.6	Bendungan Waduk PLTA Saguling 4x175 MW dan tampak Rock Fill Dam (sisi kiri) dan Pelimpasan (bagian tengah) serta Pintu Air untuk keamanan	149
III.7	Intake PLTA di Jawa Barat dengan Kapasitas 4x175 MW	150
III.8	Pipa Pesat dan Gedung PLTA di Jawa Barat	150
III.9	Pipa Pesat PLTA Lamojan	151
III.10	Ruang Turbin PLTA Cirata di Jawa Barat 6x151 MW	152
III.11	Turbin Kaplan	152
III.12	Turbin Francis Buatan Toshiba	153
III.13	Turbin Francis dan Generator 3600 M	153
III.14	Turbin Francis dan Generator 4190 M	154
III.15	Turbin Peiton Buatan Toshiba	155
III.16	Hutan Beserta Lapisan Humus & DAS	157
III.17	Pembebanan PLTA, Beban Diusahakan Maksimal tetapi Disesuaikan dengan Tersedianya Air	158
III.18	Duga Muka Air Kolam	159
III.19	Siklus Uap dan Air yang Berlangsung dalam PLTU, yang Dayanya Relatif Besar, di Atas 200 MW	161
III.20	<i>Coal Yard</i> PLTU Surabaya	165

III.21	PLTU Paiton Milik PLN	165
III.22	Ruang Turbin PLTU Surabaya	166
III.23	Unit 400 MW PLTU Paiton Milik PLN Jawa Timur	166
III.24	Unit 400 MW PLTU Paiton Milik PLN 36 Sudu Jalur Jawa Timur	167
III.25	Generator dan Turbin 400 MW di Jawa Timur	167
III.26	Turbin Uap dan Kondensor	168
III.27	Boiler PLTU Perak	169
III.28	Rangkaian Proses Demineralisasi	177
III.29	Rangkaian Air Ketel Uap	178
III.30	Rangkaian Air Ketel Uap	178
III.31	Prinsip Kerja Unit Pembangkit Turbin Gas	181
III.32	Produk-Produk Turbin Gas Buatan Aistom dan Siemens	183
III.33	Konstruksi Ruang Bakar Turbin Gas Buatan Aistom, Kompresor Disebelah Kanan dan Turbin di Sebelah Kiri	184
III.34	Skema Sebuah Blok PLTGU yang Terdiri dari 3 Unit PLTG dan Sebuah UniT PLTU	185
III.35	Diagram Aliran Uap Pada Sebuah PLTGU yang Menggunakan 3 Macam Tekanan Uap; HP ( <i>High Pressure</i> ), IP ( <i>Intermediate Pressure</i> ), dan LP ( <i>Low Pressure</i> ) buatan Siemens	187
III.36	<i>Heat-Recovery Steam</i> Generator PLTGU Tambak Lorok Semarang dari Unit PLTG 115 MW	187
III.37	PLTGU Grati di Jawa Timur (Pasuruan) Terdiri Dari: Turbin Gas : 112,450 MW x 3; Turbin Gas : 112,450 MW x 3; Turbin Uap; 189,500 MW; Keluran Blok: 526,850 MW	188
III.38	Bagian dari HRSG yang BerseNtuhan dengan Gas Buang	188
III.39	Blok PLTGU Buatan Siemens yang Terdiri dari Dua Buah PLTG dan Sebuah PLTU	188
III.40	Skematik Diagram PLTP <i>Flused Stem Sistem</i>	197
III.41	PLTP Siklus <i>Binary</i>	198
III.42	Prinsip kerja Mesin Diesel 4 Langkah	200
III.43	Prinsip kerja Mesin Diesel 2 Langkah	200
III.44	PLTD Sungai Raya Pontianak (Kalimantan Barat 4 x 8 MW, Pondasi Mesin Berada di atas Permukaan Tanah dan Jumlah Silinder 16 dalam Susunan V	203
III.45	Kurva Efisiensi Unit Pembangkit Diesel	204
III.46	Pompa Pengatur Injeksi BBM	204
	a. Posisi 1	
	b. Posisi 2	
	c. Posisi 3	
III.47	<i>Turbochanger</i> Bersama <i>Intercooler</i>	205
III.48	Gambar potongan dan Rotor <i>Turbochanger</i> Buatan MAN (a) Kompresor (b) Turbin gas	206
III.49	Mesin Diesel Buatan MAN dan B & W	207
	a. Dengan Susunan Silinder V,	
	b. Dengan Susunan Silinder Baris	

III.50	Skema Prinsip Kerja PLTN	209
III.51	Proses <i>Emulsion</i> Pada <i>Reactor</i> Nuklir	209
III.52	Reaktor dengan Air Bertekanan dan Mendidih	210
III.53	Sirkuit Dasar <i>Uninterrupted Power Supply</i>	211
III.54	Skema dan Prinsip Kerja <i>Short Break</i> Diesel Generating Set	212
III.55	Skema dan Prinsip Kerja <i>Short Break Switch</i>	212
III.56	Skema Unit Pembangkit Tenaga Angin	213
III.57	Prinsip Kerja <i>Fuel Cell</i>	214
III.58	a. Struktur Molekul <i>Cyclopentane</i> $C_5H_{10}$	219
	b. Struktur Molekul Cyclopentene $C_5H_8$	219
	c. Struktur Molekul <i>Benzene</i> $C_6H_6$	219
III.59	<i>Isooctane</i> $C_8H_{18}$ dengan Cabang Methyl $CH_3$	220
III.60	Struktur Molekul <i>Toluene</i> , Salah Satu Atom H Gganti dengan Rantai <i>Methyl</i> $CH_3$	221
III.61	a. Kantong Gas Berisi Gas Saja	224
	b. Kantong Gas Berada di atas Kantong Minyak ( <i>Petroleum Gas</i> )	224
III.62	Turbin <i>Cross Flow</i> Buatan Toshiba	227
III.63	Aliran Air Pendingin dan Uap dalam Kondensor PLTU	227
III.64	Pelindung Katodik pada Instalasi Air Pendingin	228
III.65	Transformator yang Sedang Mengalami Kebakaran dan Sedang Diusahakan Untuk Dipadamkan dengan Menggunakan Air	231
IV.1	Sebuah Sistem Interkoneksi yang Terdiri dari 4 Buah Pusat Listrik dan 7 Buah Gardu Induk (GI) dengan Tegangan Transmisi 150 kV	235
IV.1	Gambar Sebuah Sistem Interkoneksi yang terdiri dari 4 buah Pusat Listrik dan 7 buah Gardu Induk (GI) dengan Tegangan Transmisi 150 kV	235
IV.2	a. Kurva Beban Sistem dan <i>Region</i> Minggu, 11 November 2001 pukul 19.30 = 11.454 MW ( <i>Netto</i> )	237
	b. Kurva Beban Sistem dan <i>Region</i> Senin, 12 November 2001 Pukul 19.00 = 12.495 MW ( <i>Netto</i> )	237
	c. Kurva Beban Sistem dan <i>Region</i> Selasa, 13 November 2001 Pukul 18.30 = 12.577 MW ( <i>Netto</i> )	238
	d. Kurva Beban Sistem dan Region Rabu, 14 November 2001 pukul 19.00 = 12.500 MW ( <i>Netto</i> )	238
	e. Kurva Beban Sistem dan Region Kamis, 15 November 2001 Pukul 18.00 = 12.215 MW ( <i>Netto</i> )	239
	f. Kurva Beban Sistem dan <i>Region</i> Jumat, 16 November 2001 Pukul 18.30 = 12.096 MW ( <i>Netto</i> )	239
	g. Kurva Beban Sistem dan <i>Region</i> Sabtu, 17 November 2001 pukul 20.00 = 11.625 MW ( <i>Netto</i> )	240
	h. Kurva Beban Sistem dan <i>Region</i> (Idul Fitri Hari Ke 1) minggu, 16 Des.2001 Pukul 20.00 = 8.384 MW ( <i>Netto</i> )	240
	i. Kurva Beban Sistem dan Region Natal Selasa, 25 Desember 2001 Pukul 19.00 = 10.099 MW ( <i>Netto</i> )	241

j.	Kurva Beban Puncak Tahun Baru Selasa, 1 Januari 2002 pukul 19.30 = 9.660 MW ( <i>Netto</i> )	241
k.	Kurva Beban Puncak Idul Fitri 1422 H, Natal 2001 Dan Tahun Baru 2002	242
IV.3	Beban Puncak dan Beban Rata-rata Sistem	245
IV.4	Hal-hal yang dialami unit pembangkit dalam satu tahun (8760 jam)	247
IV.5	Penggambaran LOLP = $p \times t$ dalam Hari per Tahun pada Kurva Lama Beban	249
IV.6	a. Prosedur Pembebasan Tegangan Pada Penghantar No. 1 Antara Pusat Listrik A dan GI B	253
	b. Prosedur memindah Transformator PS dari Rel 1 ke Rel 2	257
	c. Gambar Prinsip dari PMT dalam Sistem Kubikel	258
	d. Sistem Rel Ganda dengan PMT Ganda Sistem Kubikal	258
IV.7	a. Konfigurasi Rel Ganda pada Pusat Listrik dengan Kondisi PMT Kopel masih Terbuka	260
	b. Konfigurasi Rel PMT 1½ pada Pusat Listrik, PMT AB <sub>2</sub> berfungsi sebagai PMT Kopel	261
V.1	<i>Disturbance Fault Recorder</i> Tipe BEN 5000 buatan LEM (Belgia)	272
VI.1	Cara Mencari Kerusakan Rangkaian Kutub	283
VI.2	Cara Memeriksa Kerusakan pada Belitan Kutub	284
VI.3	Avometer	286
VI.4	Pemeriksaan Belitan Mesin Listrik 3 Fasa Menggunakan Megger	287
VI.5	Cara Memeriksa Belitan Kutub Menggunakan Avometer	287
VI.6	Cara Memeriksa Kutub Motor Sinkron Menggunakan Kompas	289
VI.7	Motor Induksi Fasa Belah	301
VI.8	Motor Kapasitor	302
VI.9	Bagan Proses Produksi Pada Usaha Jasa Perbaikan	309
VI.10	Simbol <i>Group</i> Belitan	312
VI.11	Langkah Belitan Nomal dan Diperpendek	314
VI.12	Belitan Gelung dan Rantai	315
VI.13	Bentuk Alur dan Sisi Kumparan	316
VI.14	Jumlah Rangkaian <i>Group</i> pada Satu Fasa	317
VI.15	Belitan Stator Terpasang pada Inti	319
VI.16	Jenis Hubungan Antar <i>Group</i>	320
VI.17	Hubungan antar <i>Group</i> 1 Fasa	320
VI.18	Belitan Rantai <i>Single Layer</i>	321
VI.19	Contoh Bentangan Belitan Rantai Lapis Tunggal	322
VI.20	Contoh Betangan Belitan Notor Induksi 3 Fasa 36 Alur	322
VI.21	Contoh Bentangan Belitan Motor Induksi 3 Phase 48 Alur	323
VI.22	Contoh Bentangan Belitan Motor Induksi 3 fasa 24 alur	324
VI.23	Gambar Skema Langkah Belitan pada Alur Motor Induksi 3 fasa 36 Alur	324
VI.24	Proses Pemberian <i>Red Oxyde</i>	326
VI.25	Isolasi Alur Stator	327
VI.26	Alat Pelindung dan Alat Bantu Memasukkan Belitan pada	328

Alur	
VI.27	Pemasukan Belitan Kedalam Alur Stator 329
VI.28	Bentuk Belitan dalam Stator dan Proses Pemvarnisan 330
VI.29	Langkah Belitan Motor Induksi 3 Fasa untuk <i>Crane Double Speed 720 rpm</i> dan <i>3320 rpm Star</i> Dalam 342
VI.30	Skema dan Rangkaian Seri Atas-Bawah, Atas-Atas Motor Induksi 3 Fasa <i>Crane Double Speed 720</i> dan <i>3320 rpm</i> 343
VI.31	Skema Langkah Belitan Motor 3 Fasa 36 Alur 1500 rpm 344
VI.32	Belitan Motor AC 3 Fasa 36 Alur 1500 rpm 344
VI.33	Belitan Motor Induksi Fasa 36 Alur 3000 rpm 345
VI.34	Belitan Motor induksi 3 Fasa 24 Alur 3000 rpm 345
VI.35	Langkah Belitan Motor Induksi 3 Fasa 24 Alur 1500 Rpm 346
VII.1	Kontruksi dari Sebuah Saklar Sel Berbentuk Lurus 348
VII.2	Hubungan Jajar dari Baterai Akumulator dan Generator 350
VII.3	Hubungan Jajar Baterai Akumulator dengan Dua buah Generator Shunt dan Memakai Tiga Hantaran 352
VII.4	Pengisian Baterai aAkumulator Terbagi Beberapa Bagian 352
VII.5	Skema Pemasangan Mika Saklar 354
VII.6	Pusat Tenaga Listrik dc Memakai Saklar Sel Berganda 355
VII.7	<i>Opjager</i> 357
VII.8	Skema Sebuah Generator dengan Baterai Buffer 359
VII.9	Penambahan Belitan Magnet 362
VII.10	Medan Differensial 362
VII.11	Skema Agregat dari Piranti 363
VII.12	Rangkaian Magnet dari Mesin Arus Searah pada Umumnya 365
VII.13	Pengikat Inti Kutub Terhadap Rangka Mesin Listrik Arus Searah pada Umumnya 369
VII.14	Rangka Mesin Listrik Arus Searah yang Retak Rangkanya 369
VII.15	Cara Mencari Belitan Kutub yang Putus 371
VII.16	Mencari Hubung Singkat Belitan Jangkar dengan <i>Growler</i> 374
VII.17	Mencari Hubung Singkat Belitan Terhadap Badan 374
VII.18	Gambar Mencari Belitan Jangkar yang Hubung Singkat dengan Badan 375
VII.19	Mencari Hubungan Singkat dengan Badan 375
VII.20	Mencari Hubung Singkat terhadap Badan dengan <i>Growler</i> dan Milivoltmeter 376
VII.21	Mencari Putusnya Belitan dengan <i>Growler</i> dan Cetusan Bunga Api 376
VII.22	Mencari Putusnya Belitan dengan Jarum Magnet 376
VII.23	Mencari Putusnya Belitan dengan Mili-Voltmeter 377
VII.24	Reaksi Jangkar yang Menyebabkan Muculnya Bunga Api 378
VII.25	Arah Menggeser Sikat Setelah Timbul Reaksi Jangkar 379
VII.26	Keadaan Teoritis Reaksi Jangkar pada Motor Arus Searah 380
VII.27	Menggeser Sikat pada Motor Listrik Setelah Timbul Bunga Api 381
VII.28	Untuk Mencari Bagian Mana yang Rusak Gunakanlah Avometer 383

VII.29	Bentuk Lempeng lemel	387
VII.30	Potongan Kolektor	387
VIII.1	Bagian Alir <i>Start-Stop</i> PLTU PERAK III & IV	407
IX.2	Grafik Pengoperasian pada Turning Gear	425
IX.3	Simbol Gerbang <i>AND</i>	427
IX.4	Simbol Gerbang <i>OR</i>	428
IX.5	Simbol Gerbang <i>NOT</i>	428
IX.6	<i>On Delay</i> dan <i>Off Delay</i> pada <i>Timer</i>	429
IX.7	Contoh <i>Wiring Diagram</i> Sistem Kelistrikan PLTU Perak	436
X.1	Contoh Transformator 3 phasa dengan tegangan kerja di atas 1100 kV dan Daya di atas 1000 MVA	451
X.2	Contoh <i>Vacuum Interrupter</i>	466
X.3	<i>Gas Insulated Switchgear (GIS)</i>	467
X.4	a. <i>Gas Switchgear Combined (GSC) 550 kV</i>	467
	b. <i>Gas Switchgear Combined (GSC) 300 kV</i>	468
	c. <i>Gas Switchgear Combined (GSC) 245 kV</i>	468
	d. <i>Gas Switchgear Combined (GSC) 72,5 kV</i>	468
X.5	<i>Gas Combined Swithgear (GCS) 550 kV, 4000A</i>	469
X.6	Menunjukkan C-GIS ( <i>Cubicle Type Gas Insulated Switchgear</i> )	469
X.6	a. <i>C-GIS (Cubicle type Gas Insulated Switchgear) 72.5 kV</i>	469
	b. <i>C-GIS (Cubicle type Gas Insulated Switchgear) 24 kV</i>	470
	c. <i>C-GIS (Cubicle type Insulated Switchgear) 12 kV</i>	470
X.7	<i>Dry Air Insulated Switchgear 72.5</i>	470
X.8	<i>VCB (Vacuum Circuit Breaker) Out Door 145 kV</i>	471
X.9	<i>Reduced Gas Dead Tank Type VCB 72.5 kV</i>	471
X.10	<i>Dry Air Insulated Dead Tank Type VCB 72.5 kV</i>	472
X.11	<i>VCS (Vacuum Combined Switchgear)</i>	472
X.12	<i>VCB (Vacuum Circuit Breaker) In Door Unit</i>	473
X.13	<i>VCB (Vacuum Circuit Breaker) Indoor Unit</i>	473
X.14	<i>Oil-Immersed distribution transformers</i>	474
X.15	<i>SF6 Gas – Insulated Transformer</i>	474
X.16	<i>Cast Resin Transformer</i>	475
X.17	<i>Sheet – Winding (standart: Aluminum Optional Copper)</i>	445
X.18	Gambar gambar <i>Short Circuit Breaking Tests</i>	476
X.19	<i>Short – Time Witstand Current Test</i>	476
X.20	<i>Alternating Current With Stand Voltage Test</i>	477
X.21	<i>Internal Arc Test of Cubicle</i>	477
X.22	<i>Slide Shows</i>	478
X.23	Grafik Hubungan Sensing Tegangan Terhadap <i>Output of Generator</i>	483
X.24	Rangkaian Amplifier	484
X.25	<i>Diagram Minimum Excitay Limiter</i>	485
X.26	<i>Blok Diagram Automatic Follower</i>	486
X.27	<i>Diagram Excitacy</i>	487
X.28	<i>Diagram AVR</i>	488
XI.2	<i>Single Line diagram Pengatur Kecepatan Motor Dahlander pada Crane</i>	494
XI.1	<i>Power Diagram Line Pengatur Kecepatan Motor Dahlander</i>	493

	Pada <i>Crane</i>	
XI.3	Contoh Gambar Menentukan Torsi Mekanik	495
XI.4	Contoh Gambar Menentukan Tenaga Mekanik	496
XI.5	Contoh Gambar Menentukan Daya Mekanik	496
XI.6	Contoh Gambar Menentukan Daya Motor Listrik	497
XI.7	Contoh Menentukan Energi Kinetik pada Putaran dan Momen Enersi	500
XI.8	Contoh Gambar Menentukan Energi Kinetik pada Putaran dan Momen Enersi pada Roda 2 <i>Pully</i>	500
XI.9	Rangkaian <i>Control Plug</i>	503
XI.10	Rangkaian Daya Plugging	504
XI.11	Contoh Rangkaian Daya Pengereman Dinamik	505
XI.12	Single Diagram Rangkaian Daya Pengereman Dinamik	506
XI.13	Pengereman Regeneratif	506
XI.14	Pengereman Dinamik	507
XI.15	Sambungan <i>Solenoid</i> Rem untuk Pengasutan DOL	508
XI.16	Konstruksi dan Pengereman pada Motor Area	509
XI.17	Motor <i>Area</i> pada <i>Crane</i> Jembatan 10 Ton	510
XI.18	Motor <i>Area</i> pada <i>Crane</i> Jembatan 10 Ton	511
XI.19	Motor <i>Area</i> pada <i>Crane</i> Gantung 10 Ton untuk Mengangkat Kapal	511
XI.20	Konstruksi <i>Lift</i>	515
XI.21	Contoh Pengawatan <i>Lift</i>	517
XII.1	Bagan Jenis-Jenis Fasilitas Telekomunikasi pada Industri Tenaga Listrik	525
XII.2	Peralatan Pengait untuk Komunikasi Pembawa (PLC)	528
XII.3	Sistem Rangkaian Transmisi dengan Pembawa (PLC)	530
XII.4	Contoh Konstanta Attenuasi Saluran Transmisi	531
XII.5	Contoh Peralatan Radio	534
XII.6	Contoh Pemancar	535
XII.7	Contoh Komunikasi Radio untuk Pemeliharaan	536
XII.8	Lintasan Gelombang Mikro Dipantulkan oleh Reflektor Pasif	538
XII.9	Bagian-bagian Pemancaran (A) Antena Reflektor pasif Parabola (B) Gelombang Mikro	539
XIII.1	Contoh Pengukuran Arus Dilengkapi Transformator Arus	542
XIII.2	<i>Desain</i> Transformator Arus 500 VA, 100A/5 A untuk <i>Line</i> 230 kV	542
XIII.3	Transformator Arus 50 VA, 400 A/5 A, 60 Hz dengan Isolasi untuk Tegangan 36 kV	543
XIII.4	Transformator Toroida 1.000 A/4A untuk Mengukur Arus <i>Line</i>	544
XIII.5	Transformator Toroida Tersambung dengan Bushing	545
XIII.6	Transformator Tegangan pada <i>Line</i> 69 kV	546
XIII.7	Contoh Aplikasi Transformator Tegangan pada Pengukuran Tegangan Tinggi	547
XIII.8	Contoh Bentuk Amperemeter dan Voltmeter	547
XIII.9	Konstruksi dasar Watt Meter	548

XIII.10	Pengukuran daya (Watt-Meter 1 phasa)	548
XIII.11	Pengukuran Daya (Watt-Meter 1 Phasa / 3 Phasa)	549
XIII.12	Skema Bagan Watt-Meter 1 Phasa	549
XIII.13	Skema Bagan Watt-Meter 1 Phasa dan 3 Phasa	549
XIII.14	Cara penyambungan Wattmeter 1 phasa	550
XIII.15	Cara Pengukuran Daya 3 Phasa dengan 3 Wattmeter	550
XIII.16	Rangkaian Pengukuran Daya 3 Phasa 4 Kawat	550
XIII.17	Rangkaian Pengukuran Daya Tinggi	551
XIII.18	Alat Pengukuran $\cos \Phi$	552
XIII.19	Kopel yang Ditimbulkan	522
XIII.20	Pengukuran $\cos \Phi$ dengan Kumputan yang Tetap dan Inti Besi	533
XIII.21	<i>Diagram Vektor</i> Ambar XIII.20	554
XIII.22	Prinsip <i>Cosphimeter</i> Elektro Dinamis	554
XIII.23	<i>Cosphimeter</i> dengan Azas Kumputan Siang	554
XIII.24	Vektor Diagram Arus dan Tegangan pada <i>Cosphimeter</i>	555
XIII.25	Skala <i>Cosphimeter</i> 3 phasa	555
XIII.26	Konstruksi <i>Cosphimeter</i> dengan Garis-garis	555
XIII.27	Sambungan <i>Cosphimeter</i> 1 phasa	555
XIII.28	Sambungan Secara tidak Langsung <i>Cosphimeter</i> 1 Phasa	555
XIII.29	Pemasangan <i>Cosphimeter</i> 3 phasa	556
XIII.30	Pemasangan Secara Tidak Langsung <i>Cosphimeter</i> 3 Phasa	556
XIII.31	Kerja Suatu Frekuensimeter Jenis Batang Bergetar	557
XIII.32	Prinsip Kerja Frekuensimeter Jenis Batang Bergetar	557
XIII.33	Prinsip Kerja Frekuensimeter Tipe Elektro Dinamis	558
XIII.34	Prinsip Suatu Frekuensi Meter Jenis Pengisian- Pengosongan kapasitor	559
XIII.35	Konstruksi Frekuensi Lidah	559
XIII.36	Skala Frekuensimeter Lidah	560
XIII.37	Prinsip Kerja Meter Penunjuk Energi Listrik Arus Bolak-Balik (Jenis Induksi)	561
XIII.38	Arus <i>Eddy</i> pada Suatu Piringan	561
XIII.39	Prinsip Pengatur Phasa	562
XIII.40	Prinsip Suatu Beban Berat	563
XIII.41	Prinsip Suatu Beban Ringan	563
XIII.42	Bentuk Bentuk Penunjuk ( <i>Register</i> )	564
XIII.43	Prinsip Voltmeter Digital dengan Metode Perbandingan	565
XIII.44	Beda Antara Metode Perbandingan dan Metode Integrasi	565
XIII.45	Prinsip Sistem Penghitungan dengan Cara Modulasi Lebar Pulsanya	568
XIII.46	Alat Pencatat Penulis Pena	569
XIII.47	Contoh Cara Kerja Garis Lurus Alat Pencatat Penulis Langsung	569
XIII.48	Alat Pencatat Penulis Langsung	570
XIII.49	Cara Kerja alat Pencatat Penulis Langsung (jenis pemetaan)	570
XIII.50	Blok Diagram Suatu Alat Pencatat X-Y	571
XIII.51	Penyimpanan Suatu Sinar Elektron dalam Suatu CRT	572

XIII.52	<i>"Blok Diagram" Suatu Oscilloscope (System "Repetitive Sweep")</i>	572
XIII.53	Hubungan Antara Bentuk Gelombang yang terlibat dan bentuk Gelombang <i>"Saw-Tooth"</i> dalam Sistem <i>"Triggered Sweep"</i>	573
XIII.54	Prinsip penyimpanan <i>"Storage CRT"</i>	573
XIII.55	Contoh dari Samping <i>Oscilloskop</i>	574
XIII.56	Bentuk Suatu 1800-4500 MHz <i>Band Signal Generator</i>	574
XIII.57	<i>"Blok Diagram"</i> Untuk Rangkaian Gambar XIII. 106	574
XIII.58	Peredam Reaktansi	575
XIII.59	Pengujian Belitan Mesin Listrik 3 Fasa dengan Menggunakan <i>Megger</i>	576
XIII.60	Cara Mengukur Belitan Kutub dengan Menggunakan Avometer	576

## DAFTAR RUMUS

NO.	Rumus	No. Persamaan	Halaman
1	$S_1 = q_1 \cdot n_1 v_1$	2-1	96
2	$S_1 = q_1 \cdot n_1 \cdot E$	2-2	96
3	$K = (LS)/UA$	2-3	97
4	$P_{diel} = U^{2w} C \tan d$	2-4	97
5	$P = k \cdot \eta \cdot H \cdot qkW$	3-1	146
6	$G = \frac{11.400 \cdot p^{0,96}}{h^{1,102}}$	3-2	195
7	$P_m = S.A.I.BMEP \times \frac{n}{2 \text{ atau } 1} \times k$	3-3	201
8	$\frac{p_m - p_n \cdot 520 \cdot V_m}{30t_m + 460}$	3-4	223
9	Faktor beban = $\frac{\text{Beban rata - rata}}{\text{Beban Puncak}}$	4-1	244
10	Faktor kapasitas = $\frac{\text{Produksi 1 tahun}}{\text{Daya terpasang} \times 8.760}$	4-2	245
11	Faktor utilitas = $\frac{\text{Beban alat tertinggi}}{\text{Kemampuan alat}}$	4-3	245
12	FOR = $\frac{\text{Jmlh jam gangguan}}{\text{Jmlh jam operasi} + \text{Jmlh jam gangguan}}$	4-4	246
13	LOLP = p x t	4-5	249
14	$E = 2,22 \cdot \frac{z}{a} \cdot f \cdot k_d \cdot k_p \cdot \phi \cdot \omega \cdot 10^{-8} \cdot \text{Volt}$	6-1	282
15	$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot k_d \cdot k_p \cdot \phi \cdot \omega \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$	6-2	282
16	$E = 2,22 \cdot \frac{z}{a} \cdot f \cdot k_d \cdot k_p \cdot \phi \cdot \omega \cdot 10^{-8} \cdot \text{Volt}$	6-3	282
17	$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot k_d \cdot k_p \cdot \phi \cdot \omega \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$	6-4	282
18	$E = C \cdot \phi \cdot \text{Volt}$	6-5	282

<b>NO.</b>	<b>Rumus</b>	<b>No. Persamaan</b>	<b>Halaman</b>
19	$S/\text{phasa} = \frac{S}{3} = 12 \text{ alur}$	6-6	313
20	$\rho = \frac{f \cdot 60}{n}$	6-7	313
21	$\rho = \frac{50 \cdot 60}{1470} = 2, \dots$	6-8	313
22	$f_p = \sin \omega/T_p \cdot \pi/2$	6-9	315
23	$R = \frac{180 \cdot 2p}{S}$	6-10	319
24	Jumlah sel = $\frac{V_{\text{konstan}}}{V_{\text{keluar arus}}}$	7-1	349
25	$I = I_G + I_B$	7-2	358
26	$E_G = \frac{E_G - E_K}{R_G}$	7-3	359
27	$I_G + dI_G = \frac{E_G - (E_K - dE_K)}{R_G}$	7-4	360
28	$(I_G + dI_G) - I_G$	7-5	360
29	$dI_B = \frac{E_B - E_K + dE_K}{R_B}$	7-6	360
30	$dI_B = \frac{dE_K}{R_B}$	7-7	360
31	$dI_G : dI_B = \frac{dE_K}{R_G} : \frac{dE_K}{R_B}$	7-8	360
32	$dI_G : dI_B = \frac{1}{R_G} : \frac{1}{R_B}$	7-9	360
33	$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot \phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$	7-10	366
34	$\frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} = C$	7-11	360
35	$E = C \cdot \phi \cdot \text{Volt}$	7-12	367

36	$H = \frac{0,4 \pi N \cdot I_m}{l}$ Oersted	7-13	367
<b>NO.</b>	<b>Rumus</b>	<b>No. Persamaan</b>	<b>Halaman</b>
37	$B = \frac{0,4 \pi N \cdot I_m}{l} \mu$ Gauss	7-14	367
38	$\phi = B \cdot q$	7-15	367
39	$\phi = \frac{0,4 \pi N \cdot I_m}{l} \mu \cdot q$ garis-garis	7-16	367
40	$\phi = \frac{B \cdot A}{R_m}$ garis – garis	7-17	367
41	$\phi = \frac{C I}{R_m}$ garis – garis	7-18	368
42	$E = C \frac{C_1}{R_m}$ Volt	7-19	367
43	$E = \frac{C \cdot C_1}{R_m}$ Volt	7-20	368
44	$E = C \cdot \phi$ Volt.	7-21	370
45	$\phi = C_1 \cdot f (I_m)$ garis-garis	7-22	370
46	$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot \phi \cdot 10^{-8}$ Volt	7-23	381
47	$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot \phi \cdot 10^{-8}$ Volt	7-24	384
48	$n = \frac{E_k \cdot C}{\phi}$	7-25	384
49	$S_{20} = S_t + 0.0007(t - 20)$	8-1	397
50	$e(t) = -N(d\phi / dt)$	9-1	431
51	$V_p / V_s = N_p / N_s$	9-2	432
52	$V = 4,44 \cdot f \cdot N$	9-3	434
53	$F = B \cdot L \cdot V$	9-4	434
54	$F = 9,8 \text{ m}$	11-1	494
55	$T = F \cdot d$ (N - m)	11-2	495
56	$W = F \cdot d$ Joule	11-3	495
57	$P = W \cdot t$ watt	11-4	496

**LAMPIRAN  
E4**

*Pembangkitan Tenaga Listrik*

58	$P = \frac{nT}{9,55} \text{ Watt}$	11-5	497
----	------------------------------------	------	-----

## SOAL-SOAL LATIHAN

### BAB I. PENDAHULUAN

1. Jelaskan secara ringkas proses pembangkitan tenaga listrik pada PLTA, PLTU, PLTD, PLTPB, dan PLTN
2. Pusat pembangkit jenis apa yang banyak dikembangkan di Indonesia, jawaban disertai dengan penjelasan
3. Faktor-faktor apa saja yang harus diperhatikan dalam pengembangan pusat pembangkit tenaga listrik?
4. Sebutkan 5 (lima) kelengkapan pada pusat pembangkit listrik dan fungsinya?
5. Sebutkan 9 masalah utama dalam pembangkitan tenaga listrik, dan mana yang paling dominan?
6. Apa yang dimaksud instalasi listrik pada pusat pembangkit listrik?
7. Faktor apa saja yang dipertimbangkan dalam memilih jenis penggerak mekanis pada pusat pembangkit listrik
8. Jelaskan 2 (dua) keuntungan sistem interkoneksi pusat pembangkit listrik?
9. Gambarkan proses penyaluran tenaga listrik di Indonesia dengan disertai fungsi masing-masing bagian
10. Jelaskan faktor apa saja yang menjadi indikator mutu tenaga listrik?

### BAB II. INSTALASI LISTRIK PADA PUSAT PEMBANGKIT LISTRIK

1. Bagaimana cara melakukan instalasi pada generator sinkron dan transformator 3 phasa pada pusat pembangkit, jawaban dengan disertai gambar
2. Bagaimana cara melakukan instalasi kelistrikan pada transformator dan generator sinkron 3 phasa?
3. Bagaimana proses melakukan instalasi dari pusat pembangkit sampai ke transformator?
4. Jelaskan cara dan proses melakukan instalasi *excitacy* pada generator sinkron 3 phasa
5. Jelaskan perbedaan antara rel tunggal dan rel ganda pada pusat pembangkit listrik dengan disertai gambar
6. Sebutkan jenis dan fungsi saklar tenaga pada pusat pembangkit listrik
7. Jelaskan prinsip kerja *switchgear* pada pusat pembangkit?
8. Apa yang dimaksud instalasi sendiri pada pusat pembangkit listrik

9. Pada bagian depan dan belakang PMT harus dipasang pemisah, apa sebabnya? Jawaban dengan disertai penjelasan dan gambar.
10. Semua bagian instalasi pusat listrik yang terbuat dari logam harus ditanahkan, apa sebabnya?
11. Sebutkan cara untuk memutus busur listrik dalam pemutus tenaga.
12. Sebutkan 2 macam keuntungan dan kerugian antara pemutus tenaga menggunakan gas SF<sub>6</sub> dibandingkan pemutus tenaga hampa
13. Jelaskan mengapa pemutus tenaga dari sistem arus penguat (*excitacy*) generator harus dilengkapi tahanan yang harus dihubungkan dengan kumparan penguat generator
14. Jelaskan proses kerja pengatur otomatis dari generator berdasarkan prinsip mekanis maupun yang berdasar prinsip elektronik.
15. Sebutkan pokok-pokok spesifikasi teknik yang diperlukan dalam membeli pemutus tenaga!
16. Sebutkan relai-relai yang penting untuk memproteksi generator dengan daya di atas 10 MVA!
17. Apa fungsi yang terpenting dari baterai dalam instalasi listrik pusat listrik?
18. Apa yang mempengaruhi berat jenis *accu zuur*?
19. Bagaimana proses melakukan pemeliharaan *accu zuur*?
20. Sebutkan macam-macam transformator dan fungsinya masing-masing
21. Uraikan proses pengujian minyak transformator
22. Bagaimana cara melakukan pengukuran besaran listrik pada pusat pembangkit listrik
23. Sebutkan jenis-jenis dan fungsi sistem proteksi pada pusat pembangkit listrik
24. Bagaimana cara memelihara pusat pembangkit tenaga listrik
25. Jenis-jenis kabel apa saja yang digunakan untuk instalasi kelistrikan pada pusat pembangkit listrik
26. Bagaimana cara melakukan pengamanan pusat pembangkit listrik terhadap gangguan petir
27. Apa yang dimaksud dengan proteksi rel?
28. Bagaimana cara melakukan instalasi pada bagian vital pada pusat pembangkit listrik
29. Jelaskan prinsip kerja generator sinkron
30. Mengapa pada *rel bus* dipasang proteksi?
31. Bagaimanakah pengaruh besarnya arus *excitacy* terhadap besar *output* tegangan generator sinkron 3 fasa dengan jumlah putaran tetap, baik untuk penguatan tersendiri

**BAB III. OPERASI PADA PUSAT PEMBANGKIT LISTRIK**

1. Mengapa hutan di daerah aliran sungai penggerak PLTA perlu dilestarikan?
2. Apa fungsi saluran pesat pada PLTA?
3. Sebuah PLTA memiliki tinggi terjun 200 meter dan instalasinya maksimum bisa dilewati air sebanyak 25 m<sup>3</sup>/detik. PLTA mempunyai kolam tando tahunan.

Debit air sungai penggerak PLTA ini dalam satu tahun (365 hari) adalah sebagai berikut:

Selama 240 hari rata-rata = 60 m<sup>3</sup>/det

Selama 120 hari rata-rata = 10 m<sup>3</sup>/det

Efisiensi rata-rata PLTA  $\eta = 80\%$

Ditanya (penguapan air dalam kolam diabaikan):

- a. Berapa besar daya yang dibangkitkan PLTA?
  - b. Berapa banyak air yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kWh?
  - c. Berapa besar volume kolam tando yang diperlukan jika PLTA selalu siap operasi penuh sepanjang tahun?
  - d. Berapa besar produksi kWh yang bisa dicapai PLTA ini dalam satu tahun?
  - e. Jika PLTA dioperasikan penuh, berapa hari dapat dilakukan dalam 1 tahun?
4. Langkah-langkah apa saja yang harus dilakukan untuk mencegah terjadinya penyalaan sendiri pada batubara yang ditumpuk di lapangan?
  5. Jika daya hantar listrik air ketel melampaui batas yang diperbolehkan, langkah apa yang harus dilakukan?
  6. Apa yang terjadi jika derajat keasaman air ketel PLTU melampaui batas.
  7. Jelaskan prosedur mengoperasikan genset?
  8. Apa kelebihan dan kekurangan unit PLTD dibandingkan unit pembangkit lainnya?
  9. Apa sebabnya bahan bakar minyak dari PERTAMINA yang dapat dipakai untuk turbin gas hanyalah high speed Diesel oil (HSD)?
  10. Sebuah PLTGU menggunakan gas sebagai bahan bakar memiliki kapasitas 430 MW beroperasi dengan beban 400 MW selama 24 jam perhari. Efisiensinya pada beban 400 MW 46%. Jika setiap *standard cubic foot* mengandung 922 Btu dan harga 1 MSCF gas US\$ 2,0 dengan kurs US\$1

Rp 9.300,00. Berapa biaya pembelian gas per hari dan biaya gas per kWh. Catatan 1 kWh = 3.413 Btu.

11. Jika *excitacy* pada generator sinkron lepas dan Genset tetap berputar dan berbeban, berapa besar tegangan yang dibangkitkan
12. Bagian-bagian apa saja yang harus dipelihara pada genset

#### Bab IV. PEMBANGKITAN DALAM SISTEM INTERKONEKSI

1. Sebuah sistem tenaga listrik interkoneksi terdiri dari:
  - a. PLTA dengan 4 unit yang sama 4 x 100 MW
  - b. PLTU dengan 4 unit yang sama 4 x 600 MW
  - c. PLTGU dengan 2 blok yang sama 2 x (3 x 100 MW + 150 MW)
  - d. PLTG dengan 4 unit yang sama 4 x 100 MW, unit ke 4 baru  
Selesai terpasang bulan Maret

Jadwal pemeliharaan unit unit adalah sebagai berikut:

Januari : 1 unit PLTU selama 1 bulan  
 Februari : 2 buah unit PLTG selama 1 bulan  
 Maret : 1 blok PLTGU selama 1 bulan  
 April : 1 unit PLTA selama 1 bulan

Perkiraan beban puncak adalah:

Januari : 3600 MW  
 Februari : 3610 MW  
 Maret : 3630 MW  
 April : 3650 MW

- a. Susunlah neraca daya sistem untuk bulan Januari sampai dengan April
- b. Susunlah neraca energi dan perkiraan biaya bahan bakar sistem untuk bulan Januari, jika air untuk PLTA diperkirakan bisa memproduksi 360 MWH.

Biaya bahan bakar PLTU (batubara) rata-rata = Rp 120,00/kWh  
 Biaya bahan bakar PLTGU (gas) rata-rata = Rp 180,00/kWh  
 Biaya bahan bakar (minyak) PLTG rata-rata = Rp 800,00/kWh

Batasan jam nyala bulanan adalah:

PLTA : 700 jam PLTGU : 660 jam  
 PLTU : 660 jam PLTG : 500 jam  
 Faktor beban sistem : 0,76

2. Mengapa jam nyala unit pembangkit tidak bisa dihitung penuh, misalnya untuk bulan Januari  $31 \times 24 \text{ jam} = 744 \text{ jam}$ ?
3. Angka apa yang menggambarkan tingkat keandalan sistem interkoneksi?
4. Jelaskan bagaimana prosedur membebaskan tegangan sebuah saluran yang keluar dari pusat listrik dalam rangka melaksanakan pekerjaan pemeliharaan?
5. Apa tugas utama pusat pengatur beban dalam sistem interkoneksi?
6. Dalam sistem interkoneksi antar perusahaan (negara), angka apa yang perlu diamati untuk menentukan jual beli energi listrik?
7. Kendala-kendala apa yang harus diperhatikan dalam operasi sistem interkoneksi?
8. Apa manfaat penggunaan SCADA serta komputerisasi dan otomatisasi dalam sistem interkoneksi?
9. Bagaimanakan syarat-syarat untuk melakukan kerja jajar 2 (dua) generator sinkron 3 phasa?
10. Buat data dalam bentuk tabel yang berisi nama, spesifikasi, dan jumlah bahan serta alat untuk melakukan kerja jajar 2 generator sinkron 3 phasa
11. Bagaimana langkah-langkah dalam memperkirakan besar beban?
12. bagaimana langkah-langkah dalam melakukan koordinasi pemeliharaan pada sistem interkoneksi pusat pembangkit listrik
13. Faktor-faktor apa saja yang harus diperhatikan dalam pembangkitan?
14. Mengapa dalam pelayanan tenaga listrik harus memperhatikan kontinuitas pelayan beban
15. Tindakan apa saja yang dilakukan untuk menjamin keselamatan dan kesehatan kerja ditinjau dari segi mekanis, segi listrik dan kesehatan kerja
16. Dalam rangka untuk tujuan pemeliharaan, bagaimana prosedur dalam pembebasan tegangan dan pemindahan beban pada pusat pembangkit listrik
17. Jenis pekerjaan apa yang dapat dilakukan secara otomatisasi pada pusat pembangkit listrik
18. Kendala-kendala apa saja yang terjadi pada operasi pusat pembangkit listrik

## **BAB V. MANAJEMEN PEMBANGKITAN**

1. Apa tujuan dari manajemen operasi pembangkitan energi listrik?
2. Apa tujuan pemeliharaan unit pembangkitan?
3. Apa yang harus dilaporkan pada pemeliharaan unit pembangkit?
4. Apa yang harus dilaporkan dalam membuat laporan operasi pembangkitan?

5. Apa yang harus dilaporkan dalam membuat laporan kerusakan unit pembangkit?
6. Apa yang harus dilaporkan dalam laporan kejadian gangguan pada unit pembangkit?
7. Dalam melakukan pemeliharaan secara prediktif, besaran-besaran apa yang harus dianalisis hasilnya?
8. Langkah-langkah apa saja yang harus dilakukan dalam melakukan pemeliharaan unit pembangkit diesel dan PLTU?
9. Dimana suku cadang pada pembangkit disimpan
10. Siapa yang memberi rekomendasi untuk operasi dan pemeliharaan yang waktu akan datang

## **BAB VI. GANGGUAN, PEMELIHARAAN DAN PERBAIKAN MESIN ARUS BOLAK BALIK**

1. Sebutkan jenis gangguan dan gejala pada generator sinkron dan bagaimana cara mengatasinya?
2. Apa yang dilakukan jika terjadi pada belitan penguat generator sinkron 3 phasa?
3. Jenis kerusakan apa yang sering terjadi pada generator sinkron 3 phasa
4. Sebutkan jenis penguat pada generator sinkron 3 phasa, jawaban disertai penjelasan.
5. Sebutkan langkah-langkah dalam memelihara generator sinkron 3 phasa
6. Gangguan dan gejala gangguan apa saja yang sering terjadi pada motor induksi 3 phasa dan bagaimana cara mengatasinya?
7. Jika sekering pada motor induksi sering terputus, jelaskan apa penyebab dan cara pemeliharannya
8. Jelaskan langkah-langkah dalam melakukan pemeliharaan motor induksi 3 phasa
9. Jenis kerusakan pada bagian apa yang dapat dikategorikan kerusakan berat pada motor listrik 3 phasa
10. Bagaimana cara memelihara motor listrik yang berfungsi sebagai penggerak mesin pendingin?
11. Bagaimana cara memperbaiki dan memelihara
  - a. Lilitan stator generator terbakar
  - b. Transformator penaik tegangan rusak.
  - c. Lilitan stator motor listrik terbakar
  - d. Pemutus tenaga meledak/rusak

**BAB VII PEMELIHARAAN SUMBER ARUS SEARAH**

1. Untuk pemilihan generator dan motor listrik arus searah (DC), faktor apa saja yang harus dipertimbangkan
2. Jelaskan fungsi generator arus searah dalam pusat pembangkit listrik arus searah
3. Jika generator arus searah tidak keluar tegangan, jelaskan faktor apa penyebabnya dan bagaimana cara mengatasinya
4. Sebutkan persyaratan untuk menghubungkan jajar generator arus searah dengan baterai akumulator
5. Jelaskan fungsi baterai pada pusat pembangkit tenaga listrik arus searah
6. Langkah-langkah apa saja yang dilakukan dalam memelihara generator arus searah pada pusat pembangkit listrik arus searah?
7. Langkah-langkah apa saja yang dilakukan dalam memelihara baterai akumulator pada pusat pembangkit listrik arus searah?
8. Apa yang harus dilakukan jika generator DC, tegangan yang keluar polaritasnya terbalik?
9. Apa yang harus dilakukan jika motor DC putarannya rendah?
10. Apa yang harus dilakukan jika motor DC tidak berputar jika dibebani?
11. Apa yang harus dilakukan jika kumparan kutub atau kumparan maknit putus?
12. Bagaimana cara mengetahui jika kumparan kutub ada yang putus?
13. Jelaskan langkah-langkah dalam memeriksa dan memelihara jangkar motor DC?
14. Kapan harus dilakukan pemeliharaan pada *Accu* dan generator DC?

**BAB VIII. SISTEM PEMELIHARAAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR**

1. Kegiatan pemeliharaan apa saja yang harus dilakukan pada generator DC dan Sinkron di PLTA?
2. Mengapa pada generator pembangkit dilakukan pengukuran tahanan isolasi dan kapan harus dilakukan?
3. Mengapa dilakukan pengujian tahanan isolasi pada motor listrik yang ada di PLTA dan kapan harus dilakukan?
4. Mengapa dilakukan pengujian tahanan isolasi pada transformator yang ada di PLTA dan kapan harus dilakukan?
5. Mengapa dilakukan pemeliharaan *Accu Battery* yang ada di PLTA dan kapan harus dilakukan?
6. Bagaimana cara melakukan pengukuran nilai tahanan isolasi pada transformator? tindakan apa yang harus dilakukan jika besar tahanan isolasi tidak memenuhi persyaratan minimal?

7. Bagaimana cara melakukan pengukuran nilai tahanan isolasi pada *Oil Circuit Breaker (OCB)* transformator?
8. Bagaimana cara melakukan pengukuran nilai tahanan isolasi pada *Oil Circuit Breaker (OCB)* generator?
9. Langkah-langkah apa saja yang harus dilakukan dalam melakukan pemeliharaan *Accu Battery*?
10. Bagaimana cara melakukan pemeriksaan, perbaikan dan pemeliharaan minyak transformator?

### **BAB IX. STANDARD OPERATION PROCEDURE (SOP)**

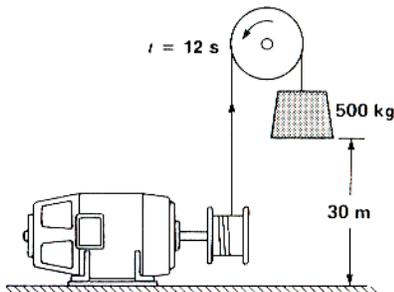
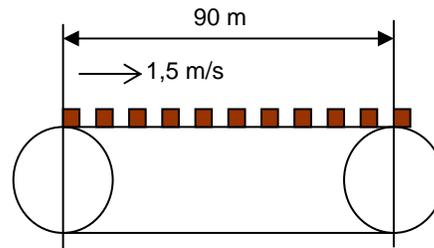
1. Apa maksud harus mengikuti *SOP* dalam melakukan pekerjaan?
2. Apa tujuan kita harus menggunakan *SOP* dalam melakukan pekerjaan?
3. Apa definisi dari *SOP*?
4. Jelaskan prosedur start dingin pada PLTU?
5. Apa yang dimaksud *BFP* dan *CWPC. Unit Start Up After 10 Hours Shut Down*
6. Jelaskan langkah-langkah pada *Turning Gear*
7. Jelaskan langkah-langkah pada pemeliharaan Genset dengan menggunakan *SOP*

### **BAB X TRANSFORMATOR DAYA, SWITCHGEAR, RELAY PROTECTION, EXCITACY DAN SYSTEM KONTROL**

1. Sebutkan klasifikasi transformator tenaga dengan disertai penjelasan
2. Sebutkan bagian-bagian transformator tenaga dan fungsi tiap-tiap bagian
3. Bagaimana prosedur pengujian atau pemeliharaan transformator
4. Sebutkan jenis switchgear dan cara memeliharanya
5. Sebutkan jenis relay proteksi pada pusat pembangkit listrik dan fungsi serta prosedur pemeliharannya
6. Apa yang dimaksud system excitasi dengan sikat dan prosedur kerja serta pemeliharannya
7. Sebutkan bagian-bagian dari sistem excitasi tanpa sikat (*Brushless Excitation*) pada PLTU
8. Jelaskan proses kerja alat pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator VR*) dan prosedur pemeliharannya
9. Sebutkan bagian-bagian dari unit AVR dengan fungsinya masing-masing
10. Jelaskan prosedur pemeliharaan sistem kontrol pada pusat pembangkit listrik

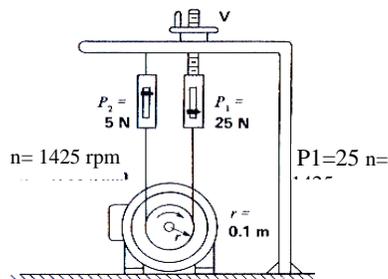
## BAB XI CRANE DAN ELEVATOR (LIFT)

1. Sebutkan fungsi *crane* pada pusat pembangkit listrik
2. sebutkan jenis-jenis motor listrik yang sering digunakan pada *crane*
3. Apa fungsi *magnetic contactor* pada rangkaian pengendali *crane*
4. Sebuah sabuk konveyor bergerak horizontal pada dengan 1,5 m/detik dengan dibebani 750 kg/jam. Panjang sabuk 90m dan digerakkan oleh sebuah motor listrik dengan kecepatan 960 rpm. Perbandingan momen enersia pada poros motor listrik seperti ditunjukkan pada gambar di samping. Tentukan momen pada poros motor listrik



5. Sebuah motor listrik dengan tenaga 150 DK (1DK = 736 Watt). Motor ini dipakai untuk mengangkat barang. Motor listrik dihubungkan pada dynamo (generator) KEM dengan tegangan 400 V. Pada motor listrik terjadi kerugian sebesar 40%. Berapakah besarnya arus yang diambil oleh dynamo atau generator KEM?

6. Motor untuk lift seperti gambar di bawah ini tetapi berat benda 600 kg dan diangkat dengan ketinggian 30 meter dalam 20 detik. Hitung daya motor listrik dalam kW dan HP (*Horse Power*, 1 HP = 746 Watt).
7. Pengembangan pemilihan motor listrik untuk mengangkat benda dengan gaya  $P_1$  15 N dan pemberat 5 N. Hitung daya *output* jika putaran motor 1.425 rpm. Jari-jari pully 0,1 m.



8. Sebutkan bagian-bagian lift dan fungsinya
9. Jelaskan prinsip kerja *lift*. Penjelasan dengan disertai gambar

10. Sebutkan prosedur pemeliharaan pada lift dan tindakan keselamatan kerja yang harus dilakukan
11. Torsi motor pada saat start 140 N-M, dengan diameter *pully* 1 meter, hitung jarak pengereman jika motor berhenti 3 m dan gaya pengereman
12. Untuk pemilihan motor listrik untuk mengangkat benda dengan gaya  $P_1$  20 N dan pemberat 5 N. Hitung daya output jika putaran motor 1.800 rpm. Jari-jari *pully* 0,1 m.
13. Motor listrik 150 kW dengan efisiensi 90 persen dioperasikan dengan beban penuh. Hitung rugi-rugi (akibat gesek dan *eddy current*) pada motor listrik tersebut.
14. Sebuah sabuk *konveyor* bergerak horizontal pada dengan 1,5 m/detik dengan dibebani 50,000 kg/jam. Panjang sabuk 240m dan digerakkan oleh sebuah motor listrik dengan kecepatan 960 rpm.. Tentukan momen pada poros motor listrik
15. Sebutkan 3 jenis cara pengereman pada motor listrik. Jawaban dengan disertai penjelasan dan gambar

## BAB XII TELEKOMUNIKASI UNTUK INDUSTRI TENAGA LISTRIK

1. Sebutkan klasifikasi penggunaan telekomunikasi untuk industri tenaga listrik, dan jelaskan perbedaannya
2. Jelaskan apa yang dimaksud dengan saluran telekomunikasi dengan kawat
3. Jelaskan apa yang dimaksud dengan sistem transmisi alat komunikasi
4. Jelaskan kelebihan dan kekurangan komunikasi dengan pembawa saluran tenaga
5. Jelaskan kelebihan dan kekurangan komunikasi dengan rangkaian transmisi
6. Jelaskan kelebihan dan kekurangan komunikasi dengan komunikasi radio
7. Jelaskan kelebihan dan kekurangan komunikasi dengan komunikasi gelombang mikro
8. Jelaskan prosedur pemeliharaan telekomunikasi untuk industri tenaga listrik

## BAB XIII ALAT UKUR LISTRIK

1. Bagaimana cara untuk melakukan pengukuran arus dengan kapasitas tinggi pada jaringan listrik. Jawaban disertai gambar dan penjelasan
2. Bagaimana cara untuk melakukan pengukuran tegangan tinggi pada jaringan listrik. Jawaban disertai gambar dan penjelasan
3. Sebutkan 2 cara untuk mengukur daya listrik pada jaringan 3 phasa. Jawaban disertai penjelasan dan gambar
4. Sebutkan 2 cara untuk mengukur daya listrik pada jaringan 3 phas. Jawaban disertai penjelasan dan gambar

5. Jelaskan prinsi pencatatan besarnya energi listrik. Jawaban disertai penjelasan dan gambar
6. Bagaimana cara mengukur besarnya tahanan isolasi dengan menggunakan *megger* (*megger* dengan *dynamo* dan diputar engkol dan *megger* dengan menggunakan baterai
7. Jelaskan prosedur pengukuran besaran listrik dengan menggunakan *oscilloscope*
8. Bagaimana prosedur pengukuran faktor daya menggunakan *cosphimeter*
9. Jelaskan prosedur pemeliharaan alat ukur listrik
10. Jelaskan prosedur pemeriksaan alat ukur listrik dan cara perbaikannya

Pembangkitan Tenaga Listrik

## **Lampiran : 1**

### **UNDANG-UNDANG KESELAMATAN KERJA**

#### **TUJUAN**

SETELAH MENYELESAIKAN MATA PELAJARAN PESERTA DIHARAPKAN MAMPU :

1. MENJELASKAN UNDANG-UNDANG KESELAMATAN KERJA YANG BERLAKU DI PLN DAN ANAK PERUSAHAANNYA
2. MENJELASKAN MACAM-MACAM BAHAYA KECELAKAAN KERJA
3. MENJELASKAN FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB KECELAKAAN DAN TINDAKAN PENCEGAHANNYA
4. MENJELASKAN TINDAK LANJUT JIKA TERJADI KECELAKAAN
5. MENJELASKAN ASPEK-ASPEK P3K
6. MENJELASKAN CARA-CARA MELAKUKAN PERNAFASAN BUATAN
7. MENJELASKAN ASPEK-ASPEK HOUSE KEEPING

Pembangkitan Tenaga Listrik

### **KECELAKAAN KERJA**

ADALAH SUATU KECELAKAAN YANG TERJADI PADA SESEORANG KARENA HUBUNGAN KERJA DAN KEMUNGKINAN DISEBABKAN OLEH BAHAYA YANG ADA KAITANNYA DENGAN PEKERJAAN.

### **KESELAMATAN KERJA**

ADALAH SUATU BIDANG KEGIATAN YANG DITUJUKAN UNTUK MENCEGAH SUATU BENTUK KECELAKAAN KERJA DILINGKUNGAN DAN KEADAAN KERJA

Pembangkitan Tenaga Listrik

**UNDANG-UNDANG NO. 1 TAHUN 1970  
TENTANG  
KESELAMATAN KERJA**

YANG MENDASARI TERBITNYA UNDANG-UNDANG INI ANTARA LAIN :

- BAHWA SETIAP TENAGA KERJA BERTAHAK MENDAPATKAN PERLINDUNGAN KESELAMATANNYA.
- BAHWA SETIAP ORANG LAIN YANG BERADA DITEMPAT KERJA PERLU TERJAMIN KESELAMATANNYA.
- PEMANFAATAN SUMBER PRODUKSI SECARA AMAN DAN EFISIEN.
- PEMBINAAN NORMA-NORMA PERLINDUNGAN KERJA.
- MEWUJUDKAN UNDANG-UNDANG YANG MEMUAT TENTANG KESELAMATAN KERJA YANG SESUAI DENGAN PERKEMBANGAN MASYARAKAT , INDUSTRIALISASI, TEKNIK DAN TEKNOLOGI.

Pembangkitan Tenaga Listrik

**TERDIRI XI BAB YANG MENGATUR :**

BAB I	TENTANG ISTILAH-ISTILAH
BAB II	RUANG LINGKUP
BAB III	SYARAT-SYARAT KESELAMATAN KERJA
BAB IV	PENGAWASAN
BAB V	PEMBINAAN
BAB VI	PANITIA PEMBINAAN KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA
BAB VII	KECELAKAAN
BAB VIII	KEWAJIBAN DAN HAK TENAGA KERJA
BAB IX	KEWAJIBAN BILA MEMASUKI TEMPAT KERJA
BAB X	KEWAJIBAN PENGURUS
BAB XI	KETENTUAN-KETENTUAN PENUTUP

Pembangkitan Tenaga Listrik

**UNDANG-UNDANG NO. 1 TAHUN 1970**  
**BAB II RUANG LINGKUP**  
**ANTARA LAIN MEMUAT :**

1. MENCEGAH DAN MENGURANGI
  - ✿ KECELAKAAN
  - ✿ BAHAYA PELEDAKAN
  - ✿ DAN MENADAMIKAN KEBAKARAN
2. MEMBERI :
  - ✿ JALAN PENYELAMATAN DIRI
  - ✿ PERTOLONGAN PADA KECELAKAAN
  - ✿ ALAT-ALAT PELINDUNG PADA PEKERJA
3. MENCEGAH DAN MENGENDALIKAN
  - ✿ PENYEBARLUASAN : DEBU PRESIFIKATOR, KOTORAN, ASAP, UAP, GAS, SINAR, RADIASI, SUARA DAN GETARAN
  - ✿ TIMBULNYA PENYAKIT AKIBAT KERJA : PHISIK MAUPUN PSIKIS, KERACUNAN INFEKSI DAN PENULARAN

**Pembangkitan Tenaga Listrik**

4. **MEMPEROLEH :**
  - ✿ PENERAPAN YANG CUKUP DAN SESUAI KEBERSIHAN LINGKUNGAN ALAT KERJA, CARA DAN PROSES KERJA
5. **MEMELIHARA :**
  - ✿ PENYEGARAN UDARA, KEBERSIHAN, KESEHATAN DAN KETERTIBAN
6. **MENGAMANKAN DAN MEMPERLANCAR PEKERJAAN BONGKAR MUAT, PERLAKUAN DAN PENYIMPANAN.**
7. **ALAT KERJA : - KK**
  - Produktivitas
  - Fungsi
  - Alat
  - Lingkungan

Pembangkitan Tenaga Listrik

**UNDANG-UNDANG NO. 1 TAHUN 1970  
BAB III KEWAJIBAN DAN HAK TENAGA KERJA  
ANTARA LAIN MEMUAT :**

1. MEMBERI KETERANGAN YANG BENAR BILA DIMINTA OLEH PEGAWAI PENGAWAS ATAU AHLI KESELAMATAN KERJA
2. MEMAKAI ALAT PELINDUNG DIRI YANG DIWAJIBKAN
3. MEMENUHI DAN MENTAATI SEMUA SYARAT K-3 YANG DIWAJIBKAN
4. MEMINTA PENGURUS AGAR DILAKSANAKAN SEMUA SYARAT K3 YANG DIWAJIBKAN
5. MENYATAKAN KEBERATAN KERJA PADA PEKERJAAN DIMANA TEMPAT KERJA SERTA ALAT-ALAT PELINDUNG DIRI YANG DIWAJIBKAN DIRAGUKAN

Pembangkitan Tenaga Listrik

### **DASAR-DASAR KESELAMATAN & KESEHATAN KERJA PLN**

1. UNDANG-UNDANG NO. 1 TAHUN 1970 TENTANG KESELAMATAN KERJA.
2. PENGUMUMAN DIREKSI NO. 023/PST/75 TENTANG KESELAMATAN MEMASUKI DAN BEKERJA DIDALAM RUANGAN SENTRAL PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK.
3. SURAT EDARAN NO. 005/PST/82 TENTANG KEWAJIBAN MEMAKAI ALAT PENGAMAN KERJA DAN SANGSINYA.
4. INSTRUKSI DIREKSI NO. 002/84 TENTANG MEMBUDAYAKAN KESELAMATAN DAN KESEHATAN DILINGKUNGAN PLN.
5. DAN BEBERAPA SE DIREKSI YANG LAIN.

Pembangkitan Tenaga Listrik

**PENGUMUMAN  
NO. 023/PST/75**

TENTANG

KESELAMATAN MEMASUKI DAN BEKERJA DIDALAM RUANGAN SENTRAL PEMBANGKIT TENAGA  
KERJA

- ✿ MENGGUNAKAN PAKAIAN DINAS
- ✿ MENGGUNAKAN SEPATU KULIT YANG TELAPAKNYA TIDAK PAKAI PAKU CERMAI ( PAKUNYA TIDAK MENONJOL )
- ✿ MENGGUNAKAN SARUNG TANGAN KULIT PENDEK
- ✿ MENGGUNAKAN ALAT PELINDUNG TELINGA
- ✿ DILARANG MEROKOK
- ✿ PEKERJA HARUS TERDIRI MINIMAL 2 0 ORANG

Pembangkitan Tenaga Listrik

**SURAT EDARAN  
NO. 055/PST/82**

TENTANG

KEWAJIBAN MEMAKAI ALAT PENGAMAN KERJA DAN SANSIKNYA

AGAR PADA DIREKTUR/PEMIMPIN/KEPALA SATUAN PLN AGAR SECEPATNYA MENGAMBIL LANGKAH

.

- SECARA BERTAHAP MEMENUHI KEBUTUHAN ALAT PENGAMAN KERJA
- MEWAJIBKAN PEMAKAIAN ALAT PENGAMAN BAGI SETIAP PEGAWAI SESUAI DENGAN PEKERJAANNYA
- MEWAJIBKAN KEPADA SEMUA PENGAWAS UNTUK

Pembangkitan Tenaga Listrik

- Tetap berada ditempat kerja
  - Memberi peringatan bagi pegawai yang tidak memakai alat pengaman
  - Memberikan petunjuk lisan tertulis tentang syarat-syarat keselamatan kerja untuk melaksanakan suatu pekerjaan
- PELANGGARAN TERHADAP KETENTUAN DIATAS DIKENAKAN SANKSI :
- Tindakan administrasi sesuai ketentuan yang berlaku, peningkat, pensiun dini dan cuti kerja
  - Tidak diberi tunjangan kecelakaan dinas bila petugas celaka tanpa memakai alat pengaman kerja

Pembangkitan Tenaga Listrik

**INSTRUKSI DIREKSI  
NO. 002/84  
TENTANG**

MEMBUDAYAKAN KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA DILINGKUNGAN PLN

- MELAKSANAKAN KAMPANYE NASIONAL DALAM MEMASYARAKATKAN K3
- UNTUK MEWUJUDKAN K3 YANG BAIK DI PLN DIPERLUKAN
- PEMBENTUKAN ORGANISASI KK SEJAJAR DENGAN TINGKATAN SEKSI
  - MEMBERIKAN BIMBINGAN DAN PENGAWASAN SECARA EFEKTIF
  - MENGAJUKAN KEBUTUHAN POSTER-POSTER BUKU-BUKU PEDOMAN K3
  - MELENGKAPI ALAT PENGAMAN KERJA

Pembangkitan Tenaga Listrik

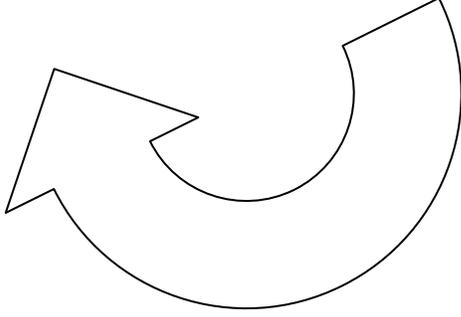
### ALASAN UTAMA PENCEGAHAN KECELAKAAN KERJA

- KEMANUSIAAN → Manusia adalah makhluk Tuhan yang tertinggi Aset perusahaan yang harus dijaga
- EKONOMI → Menjaga supaya perusahaan mendapat untung
- MANAJEMEN → Management harus baik maka management harus dijaga

## Pembangkitan Tenaga Listrik

**TIGA SUMBER KECELAKAAN**

K E M B A L I K E M A N U S I A



- MANUSIA → Karena manusia sifatnya Fleksible Sehingga kawan dalam kegiatan Kerja
- METHODE KERJA → Metode waktu kerja yang Kurang baik
- TEMPAT KERJA → Tempat kerja yang tidak mendukung

Pembangkitan Tenaga Listrik

## **MANUSIA**

- ❖ TIDAK MENGETAHUI CARA KERJA YANG BENAR DAN AMAN
- ❖ TIDAK MENGETRI BAHAYA YANG AKAN TIMBUL AKIBAT PEKERJAANNYA
- ❖ TIDAK MENGETRI MAKSUD DAN FUNGSI DARI PEMAKAIAN ALAT PENGAMAN
- ❖ KURANG MENDAPAT PENDIDIKAN DAN LATIHAN KESELAMATAN KERJA
- ❖ KURANG KOORDINASI DALAM TEAM ATAU ANTAR TEAM
- ❖ CEROBOH, SENDA GURAU, BIMBANG/RAGU
- ❖ TIDAK MENTAATI RAMBU-RAMBU PERINGATAN

Pembangkitan Tenaga Listrik

### **METHODE KERJA**

- ❁ TIDAK MENDAPAT PENJELASAN MENGENAI PROSEDUR KESELAMATAN KERJA
- ❁ PERALATAN KERJA ATAU MESIN TIDAK DILENGKAPI DENGAN PENGAMAN YANG MEMADAI, BAGIAN YANG BERPUTAR DIBERI TUTUP
- ❁ PENEMPATAN PERALATAN SECARA SEMBARANGAN
- ❁ MENGGUNAKAN ALAT TIDAK SEBAGAIMANANYA MESTINYA

### **TEMPAT KERJA**

- ❁ RUANG DAN DAERAH SEKITAR KOTOR
- ❁ TATA RUANG DAN PENERANGAN KURANG MEMADAI
- ❁ LANTAI DAN JALAN BANYAK HAMBATAN DAN TUMPAHAN MINYAK
- ❁ PROSEDUR KESELAMATAN KERJA TIDAK DIPENUHI
- ❁ RAMBU-RAMBU PERINGATAN TIDAK LENGKAP

Pembangkitan Tenaga Listrik

### MACAM BAHAYA

- MEKANIK → Benda yang berputar
- FISIK → Sakit, Lingkungan
- KIMIA → Bahan Kimia
- LISTRIK → Menjalankan Mesin
- KEBAKARAN DAN LEDAKAN → Karena Over load, pemasangan area Pada sektor max.

### AKIBAT KECELAKAAN

- KARYAWAN
- PERUSAHAAN

**Pembangkitan Tenaga Listrik****TINDAKAN PENCEGAHAN KECELAKAAN**

- KENALI ADANYA YANG DAPAT DITEMPAT KERJA DAN TINDAKAN PENGAMANANNYA
- HINDARI SITUASI YANG DAPAT MENYEBABKAN KECELAKAAN DENGAN MEMBERI TANDA-TANDA PERINGATAN PADA DAERAH TERTENTU
- LAKUKAN PERBAIKAN/MODIFIKASI PADA LOKASI YANG DAPAT MENIMBULKAN KECELAKAAN BILA MEMUNGKINKAN
- SESUAIKAN METHODE KERJA DENGAN PROSEDUR KESELAMATAN KERJA
- GUNAKAN PERALATAN PENGAMAN YANG SESUAI DENGAN SIFAT KERJANYA
- TINGKATKAN ASPEK KESELAMATAN DENGAN KONDISI LINGKUNGAN KERJA YANG BAIK
- HINDARI TINDAKAN YANG TIDAK AMAN

Pembangkitan Tenaga Listrik

### **HAUSE KEEPING**

BISA DIARTIKAN SEBAGAI :

PEMELIHARAAN RUMAH TANGGA, PERUSAHAAN, ATAU MEMELIHARAAN TEMPAT KERJA

Bahan bakar  $\longrightarrow$  Hasil aliran listrik

### **HUBUNGAN HOUSE KEEPING DENGAN KESELAMATAN KERJA**

- SEMUA ORANG PADA DASARNYA MENYENANGI KEBERSIHAN, KEINDAHAN DAN KERAPIHAN
- KEINDAHAN, KEBERSIHAN DAN KERAPIHAN AKAN MENIMBULKAN RASA NYAMAN
- TANPA DISADARI RASA NYAMAN AKAN MENINGKATKAN GAIRAH KERJA
- GAIRAH KERJA MENINGKAT BERARTI PRODUKTIVITAS MENINGKAT

Pembangkitan Tenaga Listrik

### **PRINSIP – PRINSIP MELAKSANAKAN HOUSE KEEPING**

- 🔌 BARANG YANG TIDAK BERGUNA, BERSERAKAN, SAMPAH CECERAN MINYAK DLL MERUPAKAN :
  - ▶ SUMBER PENYAKIT
  - ▶ SUMBER KEBAKARAN
  - ▶ BERBAHAYA TERHADAP KESEHATAN DAN KESELAMATAN KERJA

Pembangkitan Tenaga Listrik

**OLEH KARENA ITU BERSIHKAN DAN BUANGLAH  
DI TEMPAT YANG TELAH DITENTUKAN**

- **SETELAH SELESAI BEKERJA**
  - ▶ **KUMPULKAN ALAT DAN BERSIHKAN DAN SIMPAN DITEMPATNYA**
  - ▶ **BERSIHKAN LOKASI TEMPAT KERJA, TERMASUK SISA-SISA MATERIAL**
  - ▶ **SLANG, KABEL LISTRIK, TALI TAMBANG HARUS DIGULUNG DENGAN RAPI**
  - ▶ **MENGANGKAT, MEMINDAHKAN DAN MENUMPUK BARANG HARUS SESUAI PROSEDUR**
  - ▶ **KAMAR GANTI PAKAIAN, TOILET HARUS DIJAGA TETAP BERSIH**
- **KEBERSIHAN ADALAH PANGKAL KESELAMATAN**
- **JADIKAN KEBIASAAN HIDUP : TERTIB, BERSIH, INDAH & RAPI**

## **K E B A K A R A N**

ADALAH SUATU KEJADIAN YANG TIDAK DIKEHENDAKI KEBERADAANNYA, YANG DISEBABKAN OLEH API BESAR YANG TIDAK TERKENDALIKAN DAN MERUPAKAN SUATU BERTANDA

YANG MENYEBABKAN : - Bahan bakar  
- Udara  
- Panas

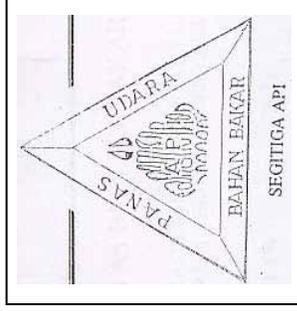
## **AKIBAT KEBAKARAN**

TIMBUL KERUGIAN :  
▶ HARTA  
▶ BENDA  
▶ JIWA  
▶ KERUSAKAN LINGKUNGAN → Tata Kota

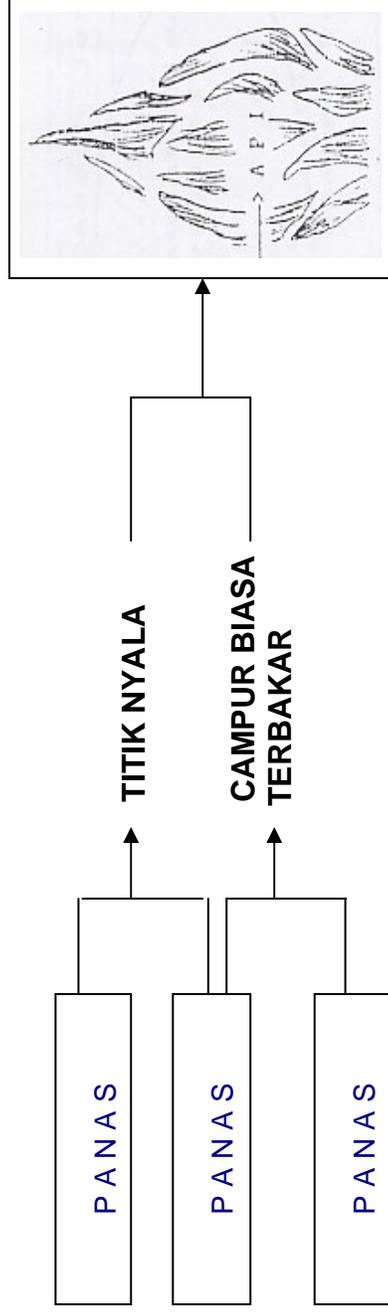
### SEBAB-SEBAB TERJADINYA KEBAKARAN

- ❖ KEGAGALAN PADA PEMADAM AWAL / API
- ❖ KETERLAMBATAN DALAM MENGETAHUI AWAL TERJADINYA KEBAKARAN → Alarm/ Detector
- ❖ TIDAK ADANYA ALAT PEMADAMAN KEBAKARAN YANG SESUAI
- ❖ TIDAK ADA ATAU KURANG BERFUNGSIONYA SISTEM DETEKSI API → Relay
- ❖ PERSONIL YANG ADA, TIDAK MENGETAHUI CARA/TEKNIK PEMADAMAN YANG BENAR

**TERJADI API**



**UNSUR API**



### BATAS BISA TERBAKAR

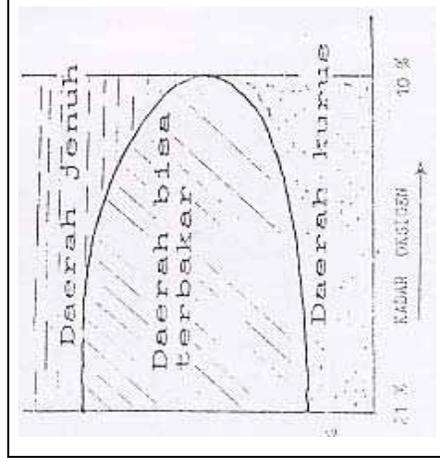
ADALAH BATAS KOSENTRASI CAMPURAN ANTARA UAP BAHAN BAKAR DENGAN UDARA YANG DAPAT TERBAKAR/MENYALA BILA DIKENAI SUMBER PANAS YANG CUKUP

CONTOH : BENSIN = 1,4 % - 7,6 %

BATAS ATAS = 7,6 %

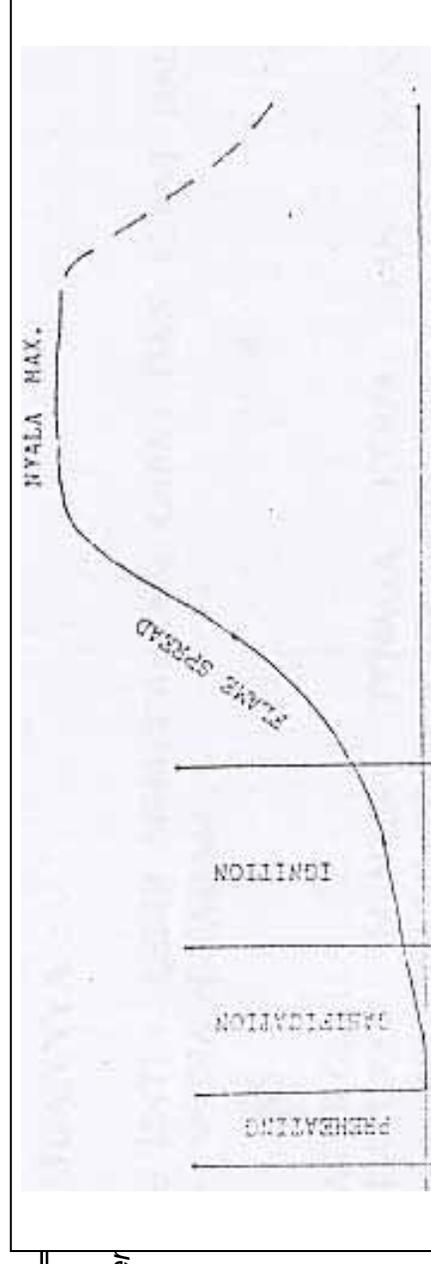
GAS b. b

BATAS BAWAH = 1,4 %



Kerosin = 1,6 % - 6 %  
Diesel Oil = 1,3 % - 6,05 %

### TAHAPAN PROSES TERJADINYA API



1. TAHAPAN PERMULAAN ( INCIPIENT )
2. TAHAP PEMBAKARAN TANPA NYALA ( SMOLDERING )
3. TAHAP PEMBAKARAN DIBARENGI DENGAN NYALA ( FLAME STAGE )

### KLASIFIKASI KEBAKARAN

#### TUJUANNYA :

UNTUK LEBIH MEMUDAHKAN, CEPAT DAN TEPAT DALAM PEMILIHAN MEDIA PEMADAMAN

#### DIATUR OLEH:

PERATURAN MENTERI TENAGA KERJA DAN TRANSMIGRASI NO. PER.04/MEN/1980 TANGGAL 14 APRIL 1980, SBB :

KLAS KEBAKARAN	JENIS KEBAKARAN
6	Pembangkitan Tenaga Listrik

- A BAHAN BAKARNYA BILA TERBAKAR AKAN MENINGGALKAN ARANG DAN ABU
- B BAHAN BAKARNYA CAIR ATAU GAS YANG MUDAH TERBAKAR
- C KEBAKARAN INSTALASI LISTRIK BERTEGANGAN
- D KEBAKARAN LOGAM

### **PRINSIP TEKNIK PEMADAMAN**

- ◆ DENGAN KETEPATAN MEMILIH MEDIA PEMADAM, MAKA AKAN DIDAPAT PEMADAM KEBAKARAN YANG EFEKTIF
- ◆ DENGAN MERUSAK/MEMUTUS KESEIMBANGAN CAMPURAN KETIGA UNSUR DIDALAM SEGI-TIGA API ( BAHAN BAKAR – PANAS – UDARA )

**INI DAPAT DILAKUKAN DENGAN CARA :**

- ⚙ STARVATION : MENGHILANGKAN ATAU MENGURANGI BAHAN BAKAR, MENGAMBIL YANG BELUM TERBAKAR → Ladang minyak

Penanggulangan kebakaran

---

- ❁ SMOTHERING : MEMISAHKAN UDARA DARI BAHAN BAKAR
- ❁ DILLUTION : MENGURANGI KADAR O<sub>2</sub> DALAM UDARA
- ❁ COOLING : MENDINGINKAN ATAU MENGURANGI PANAS BAHAN YANG TERBAKAR, SAMPAI SUHU DIBAWAH TITIK NYALA
- ❁ KIMIA DAN TEKNIK : MEMUTUSKAN RANTAI REAKSI PEMBAKARAN

**ALAT PEMADAM API TRADISIONAL**  
**Sesuai SPLN 66 – 1986**

- 
- 
1. PASIR / TANAH → Solar & bensin

- 2. SELIMUT API →
- 3. AIR → Pendinginan

#### PERLENGKAPAN APAT

- 1. GALAH/PENGGKAIT
- 2. KAMPAK
- 3. TANGGA BAMBU
- 4. TALI MANILA
- 5. LINGGIS

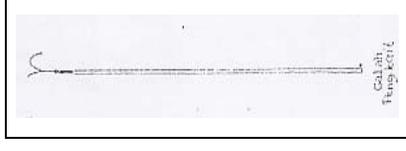
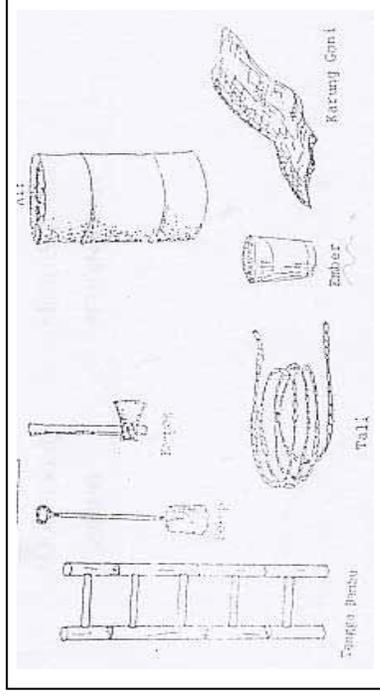
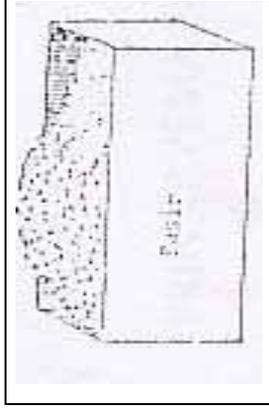
#### ALAT PEMADAM API TRADISIONAL

Sesuai SPLN 66 – 1986

Kegunaan : Memadamkan Kebakaran Jenis A  
Bahan : Pasir, Air dan Peralatan Tambahan  
Ukuran : - Pasir : 1 – 2 m<sup>3</sup>  
- Air : minimum 1 drum

## Penanggulangan kebakaran

- Perlengkapan tambahan : sekop, Galah 5 m berkait, 4 ember 3 karung Goni, kapak, tambang min 20 meter, tangga 4 m



## PASIR / TANAH

- SANGAT EFEKTIF UNTUK MEMADAMKAN KEBAKARAN LANTAI TERUTAMA UNTUK KEBAKARAN MINYAK
- DAPAT JUGA UNTUK PEMADAMAN AWAL SEMUA JENIS KEBAKARAN

- MEMBENDUNG MINYAK AGAR TIDAK MELUAS

#### **PRINSIP PEMADAMAN**

- SMOTHERING : MENGISOLASI O<sub>2</sub>
- COOLING : PENDINGINAN

#### **SELIMUT API**

- MEDIANYA KARUNG GONI (BUKAN PLASTIK) YANG DICELUPKAN DALAM AIR
  - SANGAT EFEKTIF UNTUK PEMADAMAN SEMUA JENIS KEBAKARAN KECUALI KEBAKARAN LISTRIK
  - MUDAH DIDAPAT, MURAH HARGANYA DAN MUDAH DALAM PENGGUNAANNYA
- 
-

PRINSIP PEMADAMAN

- PENDINGINAN
- PENYELIMUTAN

AIR

MEDIA PEMADAM YANG PALING BANYAK DIGUNAKAN, KARENA :

- MUDAH DIDAPAT
  - MUDAH DIANGKUT
  - DAYA SERAP PANAS YANG TINGGI
- 
-

- DAYA MENGEMBANG MENJADI UAP YANG TINGGI

#### **KELEMAHAN**

- LOKASI HARUS BEBAS DARI LISTRIK
- UNTUK KEBAKARAN MINYAK, TIDAK BISA DIGUNAKAN SECARA LANGSUNG DAN HARUS DIKABUTKAN

#### **PRINSIP PEMADAMAN**

- PENDINGINAN
- PENYELIMUTI

- APAR

## Penanggulangan kebakaran

---

- Alat pemadam ringan yaitu :
  - YAITU SUATU ALAT PEMADAM KEBAKARAN YANG DAPAT DIBAWA, DIGUNAKAN DAN DIOPERASIKAN OLEH SATU ORANG
  - COCOK UNTUK PEMADAMAN AWAL PADA LOKASI YANG ALIRAN UDARANYA TIDAK DERAS
  - BANYAK JENIS DAN MACAMNYA
  - MUDAH DIDAPAT DIPASARAN UMUM

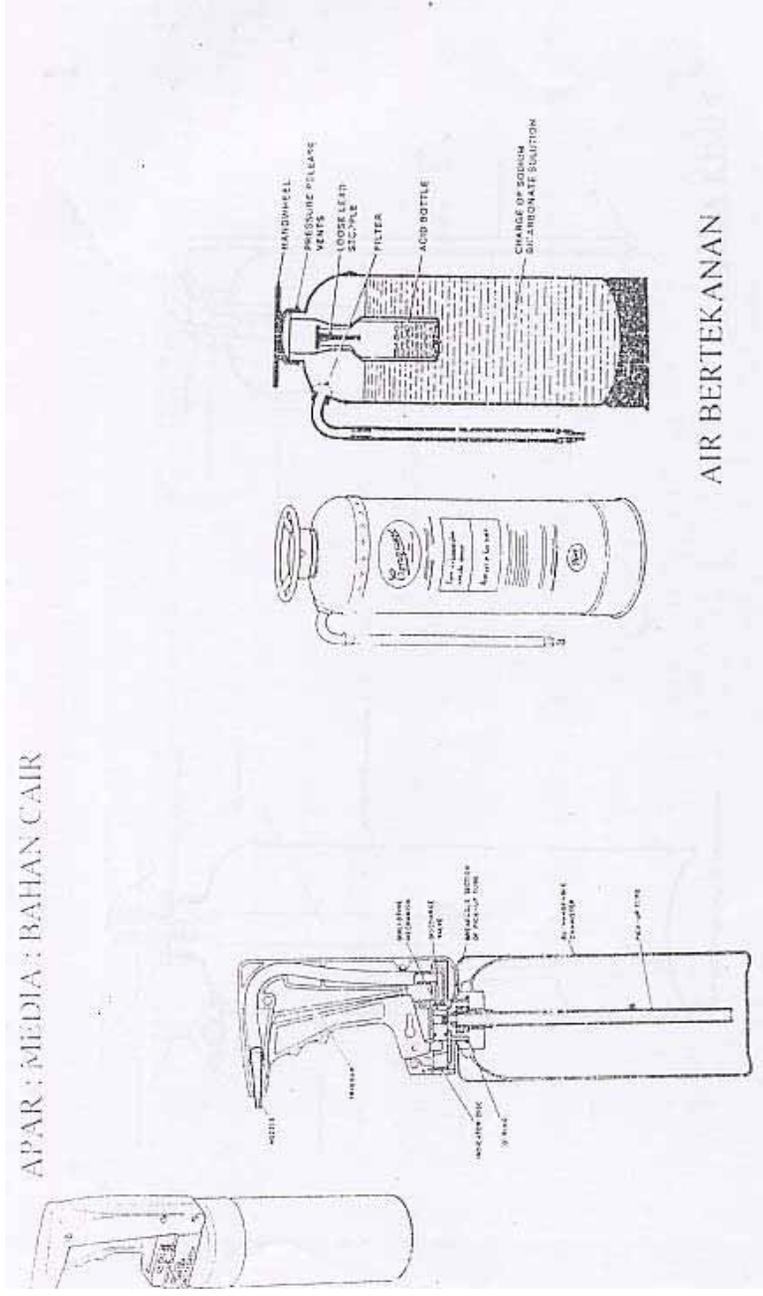
## JENIS APAR

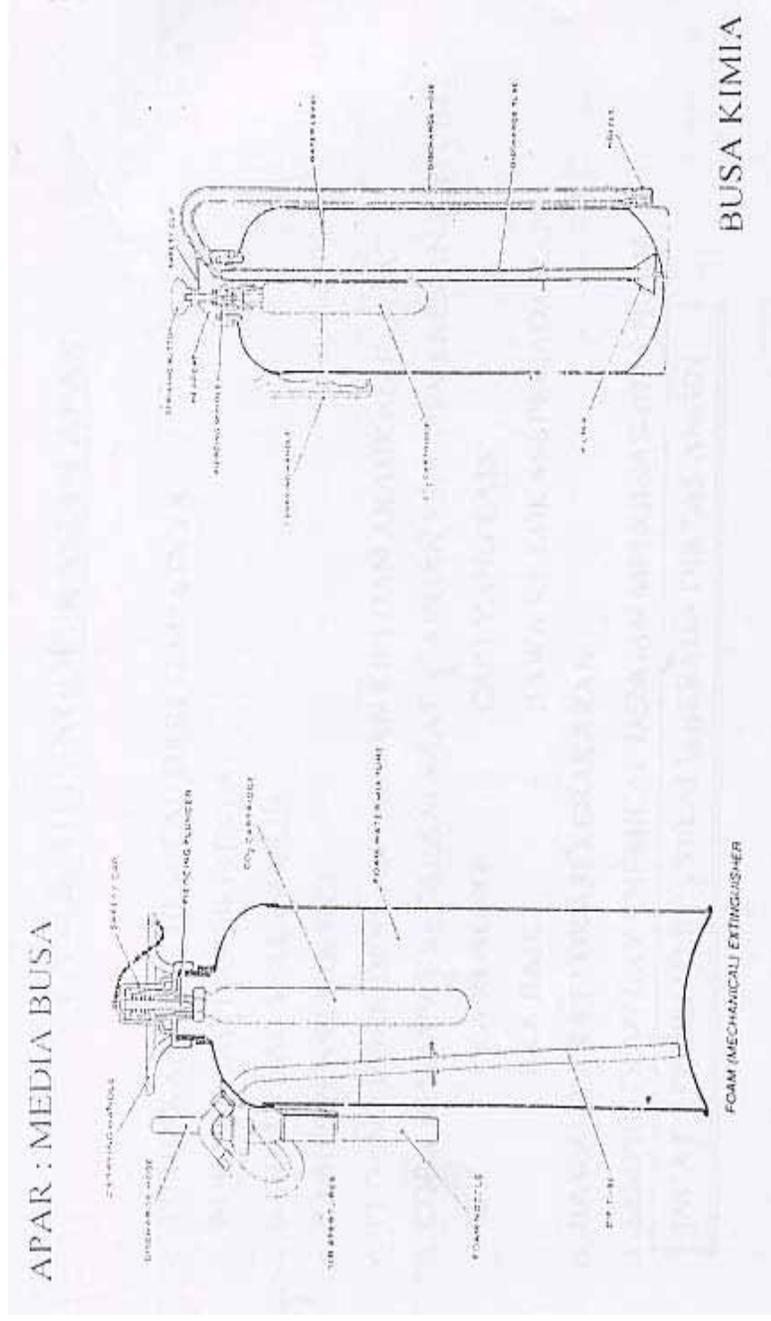
- A. BAHAN PADAT : DRY POWDER, DRY CHEMICAL MULTI PURPOSE
- B. BAHAN CAIR : - AIR BERTEKANAN

- CAIRAN MUDAH MENGUAP  
( BCF, CBM, BTM )

- C. BUSA ( FOAM )        :- BUSA KIMIA  
                                     - BUSA MEKANIK
- D. GAS                        :- CO<sub>2</sub>







### LANGKAH PENGOPERASIKAN APAR

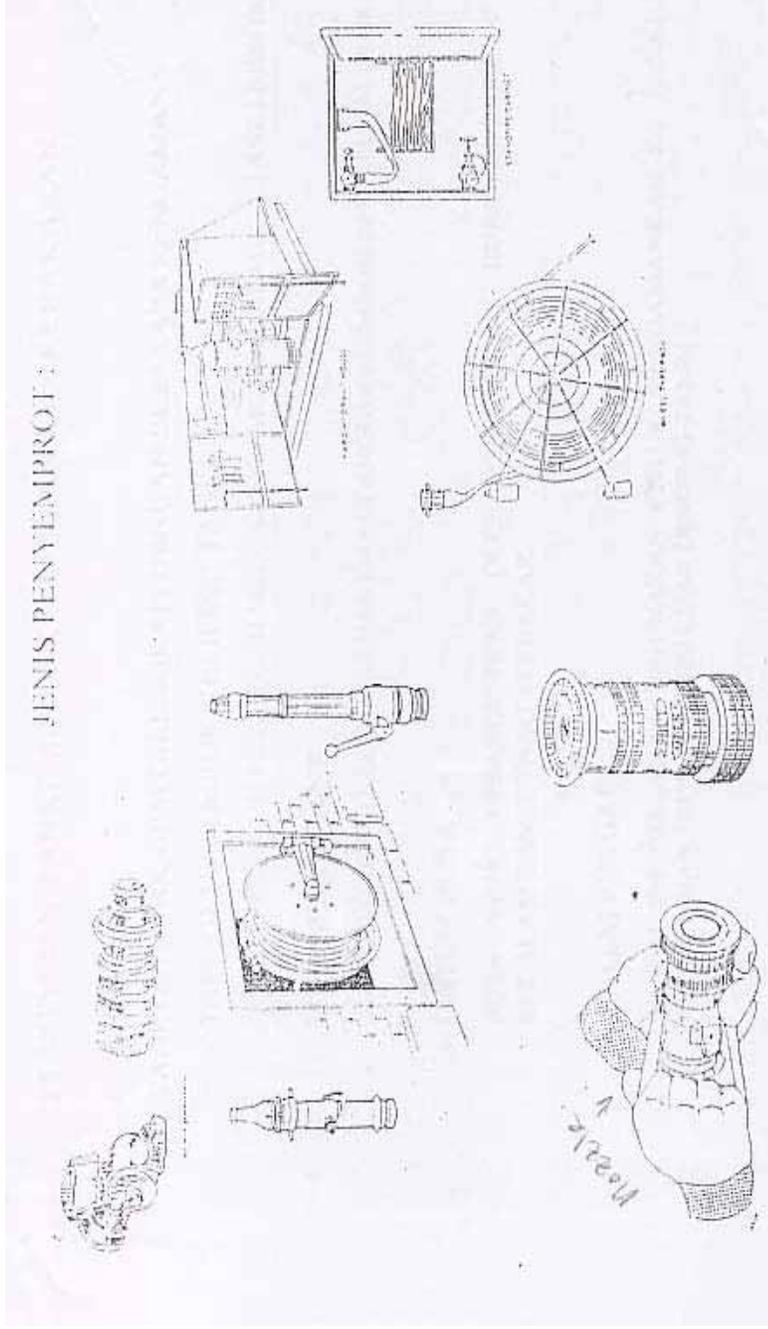
- ❖ TURUNKAN DRY CHEMICAL DARI TEMPATNYA
- ❖ BUKA SLANG DARI JEPITNYA
- ❖ CABUT LEAD SEAL (SEGEL)
- ❖ CABUT PEN PENGUNCI
- ❖ PEGANG HORN DENGAN TANGAN KIRI DAN ARAHKAN KEATAS
- ❖ COBA DITEMPAT SECARA SESAAT, (TANGAN KANAN MENEKAN KATUB)  
KET : JIKA KOSONG - CARI YANG LAIN  
JIKA BAIK - BAWA KE LOKASI PEMADAMAN
- ❖ BAWA APAR KELOKASI KEBAKARAN
- ❖ SEMPROTKAN DRY CHEMICAL DENGAN MENGIBAS-IBAS HORN

**INGAT : POSISI HARUS SELALU BERADA DIATAS ANGIN**



### PERALATAN UTAMA FIRE HYDRANT

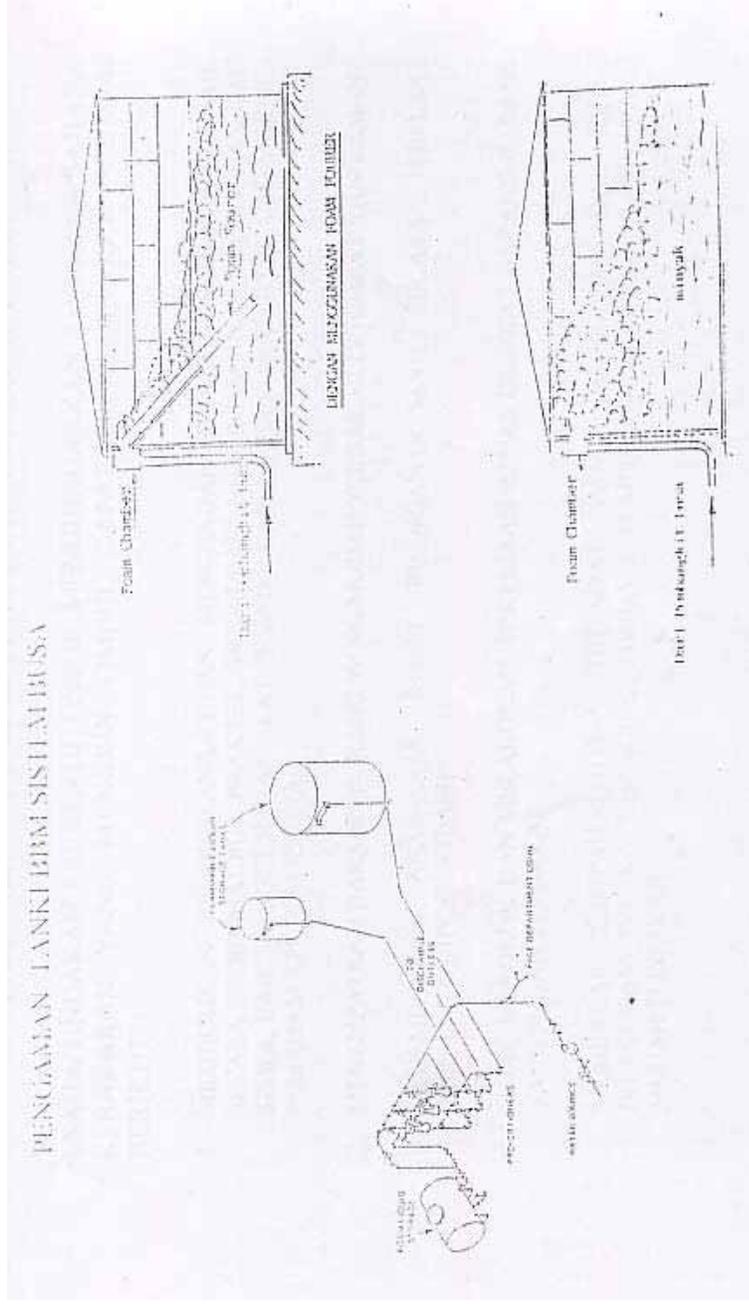
1. POMPA UTAMA → Pompa yang pertama mengambil air dari sumber air
2. POMPA JOCKY → Untuk mempertahankan tekanan air pada pipa distribusi
3. PIPA DISTRIBUSI / PENYALUR → Untuk menyalurkan air bertempat
4. YARD HYDRANT HOSE CABINET → Tempat dibelakang selang & menyimpan fire Hydrant
5. SLANG / HOSE → Menyalurkan air
6. NOZZEL PENYEMPROT → Alat yang diletakan di akhir output air yang Fungsinya untuk membentuk air



### **PENGAMAN TANKI MINYAK DARI BAHAYA KEBAKARAN**

TANKI MINYAK BBM DILENGKAPI DENGAN BEBERAPA PENGAMAN :

- TANGGUL / TEMBOK KELILING TANGKI  
GUNANYA UNTUK MENCEGAH MELUAPNYA MINYAK APABILA TANGKI BBM BOCOR
- SISTEM HYDRANT  
DIPASANG PADA KELILING LUAR DARI TANGGUL/TEMBOK PENGAMAN TANGKI
- SISTEM BUSA  
BUSA YANG DIBANGKITKAN OLEH PEMBANGKIT BUSA DIALIRKAN MASUK KEDALAM TANGKI  
TERBAKAR
- SISTEM PENGABUT  
SISTEM INI BIASANYA DIGUNAKAN UNTUK MENGAMANKAN KE TANGKI MINYAK RINGAN, DAN  
DIPASANG SISI LUAR DINDING TANGKI



**LANGKAH-LANGKAH PENCEGAHAN KEBAKARAN : :**

USAHA/TINDAKAN PREVENTIF UNTUK MENGHINDARKAN ANCAMAN BAHAYA KEBAKARAN YANG MUNGKIN TIMBUL DAPAT DILAKSANAKAN SEBAGAI BERIKUT :

1. MEMBERIKAN PENDIDIKAN/LATIHAN MENGHADAPI BAHAYA KEBAKARAN, BAIK SECARA TEORI MAUPUN PRAKTEK, MULAI DARI UNSUR PIMPINAN, KARYAWAN DAN SISWA, BAIK MENGGUNAKAN ALAT PEMADAM API RINGAN ATAU HYDRANT, MAUPUN PEMADAM API TRADISIONAL
2. MENEMPATKAN BARANG-BARANG YANG MUDAH TERBAKAR DITEMPAT YANG AMAN
3. MENEMPATKAN ANAK-ANAK KUNCI RUANGAN/GUDANG SECARA TERPUSAT (MISALNYA DIPOS SATPAM)
4. TIDAK MEROKOK DAN MELAKUKAN PEKERJAAN PANAS DIDEKAT BARANG-BARANG YANG SUDAH TERBAKAR
5. MEMBAKAR SAMPAH/KOTORAN DITEMPAT YANG DISEDIAKAN DAN TIDAK DILAKUKAN DIDEKAT BANGUNAN/ GUDANG/TUMPUKAAN BARANG-BARANG YANG MUDAH TERBAKAR

Penanggulangan kebakaran

---

6. TIDAK MEMBUAT SAMBUNGAN LISTRIK SECARA SEMBARANGAN DAN TIDAK MEMASANG STEKER SECARA BERTUMPUK-TUMPUK
7. PENYEDIAAN DAN PEMASANGAN ALAT-ALAT PEMADAM API YANG SESUAI UNTUK LINGKUNGAN KANTOR, BAIK JUMLAH MAUPUN JENISNYA
8. PEMASANGAN TANDA-TANDA PERINGATAN PADA TEMPAT-TEMPAT YANG RESIKO BAHAYA KEBAKARANNYA TINGGI, ANTARA LAIN
  - DILARANG MELAKUKAN PEKERJAAN PANAS/MEMBUAT API
  - DILARANG MEROKOK, DLL YANG SEJENIS
  - SERTA MENTAATI LARANGAN TERSEBUT
9. MATIKAN ALIRAN LISTRIK ( AC, PENERANGAN, PERALATAN PENGAJARAN, DLL) JIKA PERALATAN TERSEBUT TIDAK DIGUNAKAN )
10. BARANG-BARANG TAK TERPAKAI JANGAN DIBIARKAN BERSERAKAN DISEKITAR PERALATAN MESIN, ATAU DITEMPAT KERJA MISALNYA BAHAN SERAT, LAP KOTOR, SISA OLI
11. ALAT PEMADAM API RINGAN HARUS DILETAKAN DITEMPAT YANG MUDAH DIAMBIL DAN JANGAN DIHALANGI BENDA LAIN

12. JANGAN MENUMPUK BARANG DIDEPAN PINTU KELUAR
13. BOTOL KALENG DAN TEMPAT PENYIMPANG BAHAN MUDAH TERBAKAR JANGAN BIARKAN TERBUKA
14. JAUHKAN TABUNG GAS DARI BAHAN PANAS/SUMBER API
15. SEBELUM TEMPAT KERJA DITUTUP, PERIKSA DENGAN SEKSAMA TERUTAMA HAL YANG DAPAT MENYEBABKAN KEBAKARAN MISALNYA : PERALATAN LISTRIK DAN TEMPAT PEMBUANGAN SAMPAH
16. BUANG PUNTUNG ROKOK DAN SISA KOREK API PADA ASBAK YANG ADA DAN MATIKAN LEBIH DULU API PADA PUNTUNG ROKOK TERSEBUT
17. MENEMPATKAN ALAT-ALAT PEMADAM API PADA TEMPAT YANG MUDAH DIKETAHUI DAN SIAP DIPERGUNAKAN UNTUK MELAKUKAN PEMADAMAN UNTUK GEDUNG BERTINGKAT, LOKASI PENEMPATANNYA DIBUAT SAMA

### **LANGKAH-LANGKAH PENANGGULANGAN KEBAKARAN**

USAHA/TINDAKAN YANG CEPAT DAN TEPAT UNTUK MENANGGULANGI MENCEGAH MELUASNYA BAHAYA KEBAKARAN DENGAN MENGGUNAKAN SARANA/ALAT-ALAT PEMADAM KEBAKARAN YANG ADA, SEBAGAI BERIKUT :

1. MEMADAMKAN DENGAN MENGGUNAKAN ALAT-ALAT PEMADAM API YANG SESUAI ( APAR, APAT, HYDRAN )
2. MEMBUNYIKAN ALARM/TANDA BAHAYA ( SESUAI DENGAN KETENTUAN )
3. SECEPATNYA MEMBERITAHUKAN/MENGHUBUNGI PERTELEPON KEPADA SATPAM, KEPOLISIAN SETEMPAT, PMI/AMBULANCE SESUAI DENGAN KONDISI SITUASI LAPANGAN
4. LAPORKAN DENGAN MENYEBUTKAN NAMA PELAPOR , NOMOR TELEPON YANG DIPAKAI (KECUALI TELEPON UMUM) TEMPAT KEJADIAN KEBAKARAN, JENIS YANG TERBAKAR

5. DILOKASI KEBAKARAN DIHARAP KARYAWAN MENGAMANKAN LOKASI DARI HAL YANG MENGHABAT KELANCARAN PETUGAS MISALNYA JALAN MASUK KELOKASI MEMBUKA PORTAL
6. MENGUSAHAKN PEMADAMAN SEMAMPU MUNGKIN, DENGAN PERALATAN YANG ADA
7. BERITAHU PETUGAS TAGENTANG SUMBER AIR YANG ADA DISEKITAR LOKASI (HYDRANT, KOLAM, WADUK, Parit, DLL)
8. SELAMATKAN JIWA DAN BARANG BENDAYANG MASIH BISA DIAMANKAN
9. JIWA NILAINYA JAUH LEBIH BESAR DARI BENDA. JANGANLAH MENGORBANKAN JIWA HANYA UNTUK MENGAMANKAN BENDA

---

**YANG PERLU DIPERHATIKAN**

---

**DALAM PEMADAMAN**

ARAH ANGIN

JENIS BAHAN YANG TERBAKAR

SITUASI DARI LINGKUNGAN

VOLUME BAHAN YANG TERBAKAR

ALAT PEMADAM YANG TERSEDIA

LAMA TELAH TERBAKAR

**ISBN 978-979-060-097-3**  
**ISBN 978-979-060-098-0**

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk digunakan dalam Proses Pembelajaran.

**HET (Harga Eceran Tertinggi) Rp. 29.964,00**