

# **SISTEM TENAGA LISTRIK**

Ir. Slamet Suropto, M.Eng

Penerbit LP3M UMY

ISBN 978-602-5450-20-4



# **SISTEM TENAGA LISTRIK**

**Oleh :** Ir. Slamet Suripto, M.Eng  
Hak Cipta © 2017 pada Penulis

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang.

Diterbitkan pertama kali oleh  
Penerbit LP3M UMY  
Kampus Terpadu UMY  
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto Kasihan  
Bantul Yogyakarta Indonesia 55183

Desember 2017

ISBN 978-602-5450-20-4



## **PENGANTAR**

*Alhamdulillah* *alhamdulillah* 'Aalamiin, segala puji bagi Allah yang telah memberikan manusia akal untuk memahami dan memanfaatkan nikmat yang telah diberikannya untuk kemudahan dan kemanfaatan hidup. Shalawat dan salam semoga senantiasa dilimpahkan kepada Nabi Muhammad saw. yang telah menjelaskan dan memberi teladan kepada manusia untuk memperoleh ketenangan dan kebahagiaan hidup.

Buku yang ada di hadapan pembaca ini membahas beberapa hal tentang sistem tenaga listrik yang meliputi pembangkitan, penyaluran dan pendistribusiannya sampai ke pelanggan. Pembahasan dalam buku ini dilakukan secara garis besar dengan tujuan agar para pembaca dapat memahami secara utuh proses yang terjadi dalam sebuah sistem tenaga listrik. Dimulai dengan gambaran secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dan kondisi kelistrikan di Indonesia untuk mendapatkan informasi singkat berkaitan dengan pengelolaan energi listrik di seluruh wilayah Indonesia.

Bagian berikutnya membahas tentang konversi energi listrik dari beberapa macam energi primer yang

digunakan di unit pembangkit. Selanjutnya adalah bahasan sistem transmisi tenaga listrik meliputi macam-macamnya, kelebihan kekurangan dan wataknya. Komponen lain yang juga dibahas adalah gardu induk yang merupakan komponen yang penting untuk mengendalikan sistem. Bahasan lainnya adalah jaringan distribusi yang merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdekat dengan konsumen. Dalam bab yang terakhir buku ini dipaparkan secara singkat tentang kualitas dan keandalan sistem tenaga listrik yang mencakup parameter dan standar yang digunakan untuk menilai tingkat kualitas dan keandalan tersebut.

Kami ucapkan terima kasih bagi para penulis terdahulu yang sebagian karyanya kita jadikan rujukan dalam penulisan buku ini. Akhirnya kami sebagai penyusun mengharapkan kritik dan saran dari para pembaca untuk penyempurnaan buku ini dan berharap semoga buku ini bermanfaat bagi para pembaca terutama bagi yang mulai berminat untuk mengetahui kerja sistem tenaga listrik.

Yogyakarta, Desember 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

### BAB I SISTEM TENAGA LISTRIK ... 1

- A. Skema Sistem Tenaga Listrik ...1
- B. Fungsi Komponen Sistem Tenaga Listrik ...2
- C. Level Tegangan pada sistem tenaga listrik ...4
- D. Sistem Tenaga Listrik Terpisah dan Interkoneksi ...8
- E. Sistem Kelistrikan di Indonesia ...11

### BAB II PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK ...19

- A. Pengertian dan Macam-macamnya ...19
- B. Komponen unit pembangkit tenaga listrik ...22
- C. Pertimbangan Pembangunan Sistem Pembangkit ... 24
- D. Prinsip Kerja dan Watak Pembangkit ...26
  - 1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) ...26
  - 2. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ...32
  - 3. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) ...40
  - 4. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) ...44
  - 5. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) ...47
  - 6. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) ...52
  - 7. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)...54
  - 8. Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB) ...57

E. Generator Pembangkit ...58

1. Prinsip kerja generator ...59
2. Generator AC ... 60
3. Generator sinkron ...62
4. Prinsip kerja generator sinkron ...63
5. Watak generator sinkron ...66

BAB III SALURAN TRANSMISI ... 71

A. Pengertian dan macamnya ...71

1. Klasifikasi saluran transmisi berdasar penempatan konduktornya ... 74
2. Klasifikasi saluran transmisi berdasar tegangan kerjanya ...78
3. Klasifikasi saluran transmisi berdasar jenis arus listrik yang disalurkan ...82

B. Peralatan utama saluran transmisi ...84

C. Penghantar Saluran Transmisi ...85

D. Isolator ...88

E. Watak Tegangan Saluran Transmisi ... 90

F. Efisiensi Saluran Transmisi ...92

BAB IV GARDU INDUK DAN TRANSFORMATOR ...95

A. Klasifikasi Gardu Induk ...95

B. Peralatan utama Gardu Induk ... 101

C. Transformator ...112

1. Prinsip kerja trafo ...113
2. Watak trafo daya pada sistem tenaga listrik ...116

## **BAB V JARINGAN DISTRIBUSI ...123**

### **A. Pengertian dan Macamnya ...123**

1. Tegangan jaringan distribusi ... 124
2. Macam jaringan distribusi ...126
3. Topologi jaringan ...127
4. Peralatan pendukung jaringan distribusi ...130

### **B. Trafo Distribusi ...134**

### **C. Kinerja Jaringan Distribusi ...137**

## **BAB V KUALITAS DAN KEANDALAN SISTEM TENAGA LISTRIK ... 145**

### **A. Keandalan Distribusi Tenaga listrik ...146**

### **B. Kualitas Distribusi Tenaga Listrik ...151**





# **BAB I**

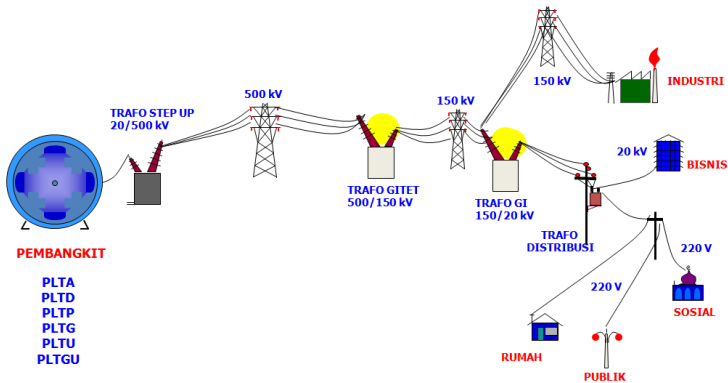
## **SISTEM TENAGA LISTRIK**

### **A. Skema Sistem Tenaga Listrik**

Secara umum, sistem diartikan sebagai suatu kesatuan yang terdiri beberapa komponen atau elemen yang dihubungkan untuk memudahkan aliran informasi, materi atau energi untuk mencapai suatu tujuan. Dengan demikian, sebuah sistem pasti terdiri dari beberapa komponen penyusun yang dihubungkan sedemikian rupa sehingga dapat bekerja sesuai perannya masing-masing untuk mencapai tujuan tertentu. Bila dikaitkan dengan tenaga listrik, maka yang akan mengalir dalam sistem itu adalah tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, antara lain unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi yang berhubungan sedemikian rupa dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai

kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema gambar 1.1



Gambar 1.1 Skema sistem tenaga listrik

## B. Fungsi Komponen Sistem Tenaga Listrik

Fungsi masing-masing komponen secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Unit pembangkitan merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari generator pembangkit tenaga listrik yang digerakkan oleh turbin. Unit pembangkitan berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengubah energi primer yang berasal dari sumber energi lain, misalnya air, batu bara, panas bumi atau minyak bumi menjadi energi listrik.

2. Saluran transmisi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang berupa konduktor yang dibentang antara pembangkit dan gardu induk pusat beban atau antar gardu induk. Saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan daya atau energi listrik dari pusat pembangkitan ke gardu induk pusat beban atau antar gardu induk.
3. Gardu induk merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari peralatan pemutus-penghubung tenaga listrik dan trafo penurun tegangan yang terletak antara saluran transmisi dan jaringan distribusi. Gardu induk berfungsi untuk mengatur aliran tenaga listrik dan menyesuaikan level tegangan sistem.
4. Jaringan distribusi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri daripenghantar yang dibentang mulai dari gardu induk sampai dengan lokasi pelanggan. Jaringan distribusi berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dari gardu induk pusat beban ke lokasi konsumen/pelanggan energi listrik.

Sistem tenaga listrik mempunyai tujuan utama yaitu memenuhi kebutuhan energi listrik yang aman dan nyaman

bagi konsumen/pelanggan sesuai kebutuhan, baik level tegangan, besar daya maupun jumlah energinya.

### **C. Level Tegangan pada sistem tenaga listrik**

Pada suatu sistem tenaga listrik, tegangan yang digunakan pada masing-masing komponen dapat berbeda-beda sesuai dengan kepentingannya. Dengan kata lain, setiap komponen pada sistem tenaga listrik bekerja dengan level tegangan yang berbeda-beda. Hal ini dilakukan agar sistem menjadi lebih ekonomis.

#### **1. Tegangan Unit pembangkit**

Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi dan kapasitas generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 4,5 s/d 20 kV. Untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan agar arus yang mengalir tidak terlalu besar. Karena untuk kapasitas daya generator tertentu, besarnya arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangannya. Artinya semakin tinggi tegangan, maka arus yang mengalir semakin kecil. Apabila arus yang mengalir

pada generator semakin kecil, maka luas penampang kawat lilitan yang dibutuhkan menjadi lebih kecil, sehingga ukuran generator dapat lebih kecil dan dapat lebih murah. Bila arus yang mengalir lebih kecil, maka rugi daya pada lilitan menjadi lebih kecil, sehingga lebih ekonomis.

Level tegangan pada pembangkit biasanya tidak terlalu tinggi, karena semakin tinggi level tegangan generator, maka jumlah lilitan generator tersebut harus semakin banyak. Dengan lilitan yang lebih banyak akan mengakibatkan generator menjadi lebih besar dan lebih berat, sehingga menjadi kurang efisien. Disamping itu dengan dimensi generator yang besar dan berat akan menambah kesulitan dalam pengangkutan dan pemasangannya. Sebaliknya untuk kapasitas generator yang lebih kecil biasanya menggunakan level tegangan keluaran yang relatif rendah agar lebih ekonomis.

Bila unit pembangkit akan dihubungkan dengan dengan saluran transmisi yang mempunyai level tegangan yang lebih tinggi, maka dibutuhkan peralatan penaik tegangan yang berupa transformator penaik tegangan atau *step uptransformer*.

## **2. Tegangan Saluran transmisi:**

Sistem saluran transmisi biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi dari pada tegangan pada unit pembangkit. Hal ini karena fungsi pokok saluran transmisi adalah menyalurkan daya/energi listrik, sehingga yang dipentingkan adalah sistem mampu menyalurkan daya dengan efisiensi yang tinggi atau rugi-rugi daya kecil. Upaya yang dilakukan adalah mempertinggi level tegangan agar arus yang mengalir pada saluran transmisi lebih kecil. Bila arus yang mengalir pada penghantar saluran transmisi semakin kecil, maka rugi daya yang terjadi pada jaringan akan semakin kecil, sehingga saluran transmisi menjadi lebih efisien. Demikian juga dengan semakin kecil arus, maka turun tegangan yang terjadi pada saluran juga lebih kecil, sehingga tegangan pada ujung penerima tidak terlalu rendah.

Sekalipun demikian, semakin tinggi tegangan saluran transmisi memerlukan peralatan yang mempunyai tingkat isolasi yang lebih tinggi yang konsekuensinya harganya menjadi lebih mahal. Dan juga untuk kepentingan keamanan dan keselamatan lingkungan, memerlukan tower penyangga yang lebih tinggi. Tegangan saluran transmisi umumnya

berkisar antara 70 kV s/d 1000 kV. Saluran transmisi dengan tegangan 500 kV atau lebih akan lebih ekonomis jika digunakan untuk menyalurkan daya yang cukup besar dan jarak pengiriman yang cukup jauh. Sedangkan untuk jarak dekat dan daya yang tidak begitu besar biasanya digunakan tegangan yang lebih rendah agar biaya pembangunannya dapat lebih murah.

### **3. Tegangan jaringan distribusi**

Jaringan distribusi biasanya menggunakan level tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi. Hal ini karena daya yang didistribusikan biasanya relatif kecil dan letak jaringan distribusi lebih banyak berada di sekitar pemukiman pelanggan, sehingga sangat perlu mempertimbangkan faktor keselamatan. Jaringan distribusi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan konsumen, sehingga level tegangannya menyesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atau pengguna energi listrik.

Level tegangan jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV dan jaringan tegangan rendah (JTR) 220 V. Dengan demikian pada jaringan distribusi diperlukan

trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari JTM 20 kV ke JTR 220V sesuai tegangan pelanggan. Jaringan tegangan menengah (JTM) biasanya digunakan untuk menghubungkan antara gardu induk ke beban yang memerlukan daya relatif besar, seperti industri, rumah sakit, mall atau kampus yang biasanya berlangganan tegangan menengah 20 kV. Sedangkan beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya dihubungkan dengan jaringan tegangan rendah 220 V.

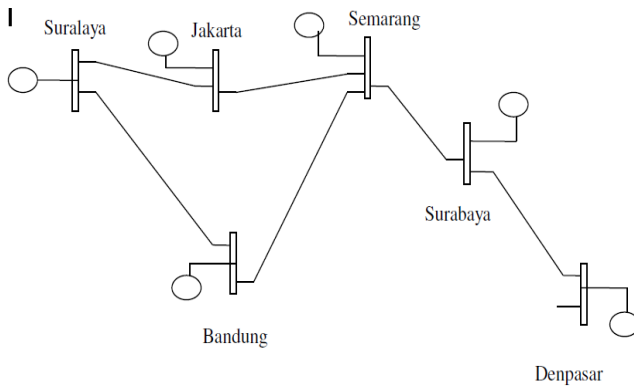
#### **D. Sistem Tenaga Listrik Terpisah dan Interkoneksi**

Sistem tenaga listrik yang diuraikan di atas adalah sistem tenaga listrik yang mempunyai satu unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk dan beberapa jaringan distribusi yang melayani beberapakeleompok beban. Sistem tenaga listrik ini tidak berhubungan dengan sistem tenaga listrik yang lain. Sistem tenaga listrik yang demikian disebut sistem tenaga listrik terpisah atau *isolated*. Secara skematis sistem tenaga listrik terpisah sebagaimana terlihat pada gambar 1.1 di atas.



Sistem ini mempunyai kelebihan, biaya investasi relatif lebih murah dan pengelolaannya lebih sederhana, karena tidak memerlukan saluran transmisi sebagai penghubung dengan sistem tenaga listrik lain yang kadang jaraknya cukup jauh. Sistem ini biasanya digunakan pada sistem tenaga listrik yang mempunyai kapasitas daya relatif kecil dan jarak dengan sistem yang lain cukup jauh. Kekurangan atau kelemahan sistem ini adalah kontinuitas pelayanan kurang baik, karena bila pada unit pembangkit atau saluran utama terjadi gangguan, maka pelayanan ke beban akan terganggu atau bahkan bisa terhenti sama sekali. Demikian juga ketika pada sistem itu kekurangan daya, maka tidak dapat di bantu dari sistem yang lain.

Namun dalam prakteknya, kadang suatu sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa sistem pembangkit yang saling berhubungan untuk melayani beberapa macam beban yang ada pada lokasi yang berlainan. Sistem tenaga listrik yang demikian disebut sistem tenaga listrik interkoneksi, artinya masing-masing sistem dapat saling mengirimkan daya yang dibangkitkan bila diperlukan. Secara skematis sistem tenaga listrik interkoneksi sebagaimana terlihat pada gambar 1.2



Gambar 1.2 Skema sistem tenaga listrik interkoneksi

Dengan sistem interkoneksi ini diharapkan kualitas pelayanan dapat menjadi lebih baik. Bila ada unit pembangkit yang terganggu sehingga tidak mampu mensuplai daya penuh, maka kebutuhan beban di sekitarnya dapat disuplai dari unit pembangkit yang lain melalui saluran transmisi yang dipasang antar unit pembangkit atau antar pusat beban. Dengan sistem interkoneksi, sistem tenaga listrik menjadi lebih kompleks, sehingga biaya pembangunan dan operasionalnya menjadi lebih besar dan pengelolaannya menjadi lebih rumit. Dengan demikian sistem interkoneksi hanya layak digunakan pada sistem tenaga listrik dengan daya besar dan memerlukan standar

kualitas pelayanan yang tinggi. Lebih jauh lagi, sistem interkoneksi bisa dikembangkan sehingga pengoperasian pembangkit dan aliran daya dapat dilakukan dari pusat pengatur sistem untuk mendapatkan operasi yang paling ekonomis.

## **E. Sistem Kelistrikan di Indonesia**

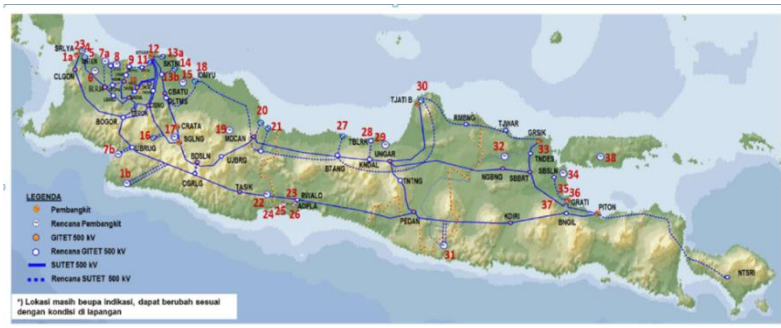
Sistem kelistrikan di Indonesia secara keseluruhan dikelola oleh satu perusahaan yaitu PT. PLN Persero mulai dari unit pembangkitan sampai dengan jaringan distribusi ke pelanggan. Sistem kelistrikan di Indonesia menggunakan beberapa jenis energi primer antar lain: air, batu bara, BBM, gas alam, panas bumi dan sumber energi terbarukan. Semua jenis energi ini dikelola secara terpadu untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang optimal.

Untuk mendapatkan gambaran kelistrikan di Indonesia berkaitan dengan sebaran konsumsi energi listrik di beberapa wilayah di Indonesiasepanjang tahun 2016, dapat diamati dari data penjualan energi listrik sebagaimana terlihat pada tabel 1.1

Tabel 1.1 Penjualan energi listrik tahun 2016 (TWh)

Jawa- Bali	162.872
Sumtera	32.102
Kalimantar	8.923
Sulawesi & Nusa Tenggara	11.680
Maluku & Papua	2.269
Indonesia	217.826

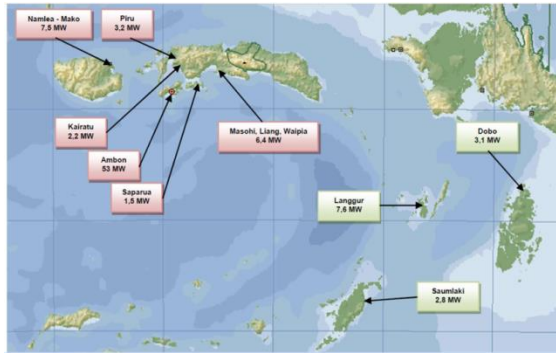
Dengan perbedaan konsumsi energi listrik di berbagai wilayah di Indonesia, maka sistem tenaga listrik yang digunakan juga berbeda-beda. Sistem tenaga listrik untuk wilayah yang kebutuhan bebannya terbesar, seperti pulau Jawa-Bali menggunakan sistem interkoneksi yang dapat dioperasikan dari satu pusat pengatur beban. Hal ini dilakukan dengan harapan pengoperasian pembangkit dapat diupayakan seoptimal mungkin dan kontinuitas pelayanan dapat lebih baik, karena bila ada kekurangan energi di satu wilayah dapat dibantu dari wilayah lain. Sistem Intekoneksi Jawa-Bali dapat dilihat pada gambar 1.3.



Gambar 1.3 Sistem Intekoneksi Jawa-Bali

Untuk wilayah yang kebutuhan bebannya tidak begitu besar, seperti Sumatra, Kalimantan dan Sulawesi, sebagian wilayah dinilai layak menggunakan interkoneksi, sedangkan sebagian wilayah lainnya masih menggunakan sistem terpisah/*isolated*. Adapun sebagian besar wilayah Indonesia Timur menggunakan sistem terpisah karena kebutuhan dayanya masih relatif kecil, sehingga dinilai tidak ekonomis bila menggunakan sistem interkoneksi. Sebagian wilayah di Indonesia Timur yang menggunakan sistem *isolated* dapat dilihat pada gambar 1.4.

Energi listrik di Indonesia sebagian besar masih digunakan untuk kepentingan rumah tangga, baik untuk penerangan maupun keperluan lain. Setelah itu barulah kebutuhan listrik untuk sektor industri dan sektor lain.



Gambar 1.4 Sistem kelistrikan di sebagian Indonesia Timur

Sebagai gambaran, sebaran penggunaan energi listrik di Indonesia dapat diamati pada tabel 1.2

Tabel 1.2 Penggunaan energi listrik di Indonesia tahun 2016

Rumah tangga	95.329 TWh
Industri	68.928 TWh
Bisnis	39.534 TWh
Sosial	6.364 TWh
Gedung Kantor Pemerintah	3.964 TWh
Penerangan Jalan Umum	3.706 TWh

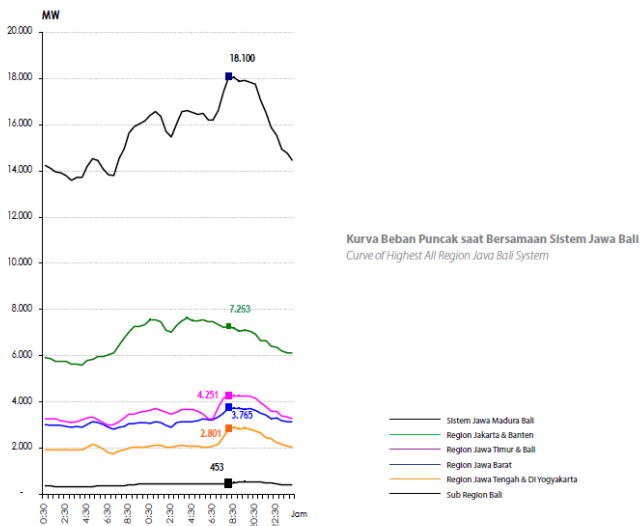
Jumlah pelanggan listrik di Indonesia pada tahun 2016 tercatat sekitar 65 juta pelanggan yang sebagian

besarannya adalah pelanggan rumah tangga yang mencapai 59 juta. Sisanya adalah pelanggan industri, publik, sosial dan kantor pemerintah. Dari 65 juta pelanggan, sebagian besar juga ada di wilayah Jawa-Bali sekitar 41 juta, selebihnya pelanggan di wilayah lain.

Pertumbuhan beban puncak sistem kelistrikan di Indonesia semakin tahun semakin bertambah. Pertumbuhan beban yang cukup tinggi didominasi wilayah perkotaan atau daerah industri, terutama di pulau Jawa. Untuk meningkatkan kualitas pelayanan, pertumbuhan beban puncak harus diimbangi dengan penambahan kapasitas pembangkitan. Sebagai ilustrasi, di wilayah Jawa-Bali beban puncak pada tahun 2015 tercatat 24.807 MW. Untuk melayani beban itu kapasitas pembangkit yang siap dioperasikan di wilayah ini mencapai 33.824 MW yang mempunyai kemampuan membangkitkan serentak sebesar 31.694 MW. Dengan demikian diharapkan tidak kekurangan daya untuk melayani beban puncak yang terjadi.

Kondisi beban puncak yang terjadi pada suatu wilayah selalu berubah-ubah setiap saat tergantung jumlah pemakaian beban serentak saat itu. Sebagai contoh, beban tertinggi harian paling sering terjadi sekitar pukul

19:00 karena sebagian besar beban adalah beban rumah tangga. Pada saat itu beban penerangan rumah tangga maksimal, dan juga banyak peralatan listrik rumah tangga yang beroperasi. Kemudian beban terendah sering terjadi pada sekitar pukul 03:00 dini hari, yang saat itu sebagian penghuni rumah istirahat dan peralatan listrik banyak yang tidak dioperasikan. Sebagai contoh kondisi perkembangan beban puncak harian listrik Jawa-Bali pada satu hari yang tercatat di tahun 2010 ditunjukkan dalam gambar 1.5.



Gambar 1.5 Grafik beban puncak harian listrik Jawa-Bali

Dari sisi pemakaian energi primer, kelistrikan di Indonesia sampai dengan tahun 2016 masih didominasi oleh



batubara sebesar 54,6 %, disusul gas 26 %, air 7,8 %, BBM 6,5 %, panas bumi 4,3 % dan energi terbarukan 0,8 %. Untuk pembangkit kapasitas besar yang sebagian besarnya ada di pulau Jawa, paling banyak menggunakan batu bara, sehingga biaya produksi energi listrik atau yang biasa disebut biaya pokok penyediaan (BPP) relatif lebih murah, tercatat di tahun 2008 sekitar Rp. 1.000,- per kWh. Hal ini berbeda dengan daerah di wilayah Indonesia Timur yang sebagian besarnya menggunakan sumber energi BBM yang pada tahun yang sama BPP energi listrik tertinggi di Papua tercatat sebesar Rp. 3.192,- per kWh.

Rasio elektrifikasi merupakan angka perbandingan antara jumlah rumah tangga yang berlistrik dengan jumlah rumah tangga yang ada di wilayah tertentu yang biasanya ditampilkan dalam bentuk persen. Rasio elektrifikasi di wilayah Jawa-Bali relatif lebih tinggi yang tercatat pada tahun 2014 mencapai 84,5 %. Sedangkan untuk wilayah Indonesia Timur masih relatif rendah yaitu 73,9 %. Penyebab utamanya adalah keterbatasan kapasitas pembangkit dan keadaan geografis beban yang tersebar.

**SOAL LATIHAN:**

1. Jelaskan dengan skema dan penjelasan singkat, apa yang dimaksud dengan sistem tenaga listrik.
2. Jelaskan fungsi jaringan distribusi pada suatu sistem tenaga listrik.
3. Saluran transmisi biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi dibanding sistem yang lain, mengapa demikian?
4. Sistem interkoneksi di Indonesia hanya dilakukan di daerah pulau jawa, sedang di daerah lain tidak dibuat demikian, jelaskan.
5. Atas pertimbangan apa beban industri atau rumah sakit yang cukup besar berlangganan PLN dengan tegangan menengah 20 kV bukan tegangan rendah 220 volt.

## **BAB II**

### **PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK**

#### **A. Pengertian dan Macam-macamnya**

Pembangkit tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi membangkitkan energi listrik dengan mengubah sumber energi lain menjadi energi listrik. Sumber energi tersebut dapat berupa energi air, bahan bakar minyak, batu bara, angin, surya dan lain-lain. Untuk menghasilkan energi listrik diperlukan sebuah alat pembangkit yang sering disebut generator. Generator hanya dapat membangkitkan energi listrik jika porosnya diputar. Untuk memutar generator diperlukan energi mekanik yang biasanya dihasilkan oleh turbin. Turbin inilah yang difungsikan untuk mengubah energi dari sumber energi primer menjadi energi gerak atau energi mekanik.

Suatu unit pembangkit tenaga listrik biasanya diberi nama sesuai dengan jenis energi primer yang digunakan. Misalnya pembangkit listrik tenaga air (PLTA), berarti energi primernya berupa tenaga yang dimiliki oleh air yang berada di waduk atau sungai yang digunakan untuk memutar turbin atau kincir air. Jenis pembangkit lain adalah

pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pada pembangkit ini turbin digerakkan dengan tenaga uap panas yang dihasilkan dari pemanasan air hingga menjadi uap bertekanan tinggi. Pemanasan air dapat dilakukan menggunakan bahan bakar batubara, bahan bakar minyak atau gas alam. Untuk pembangkit dengan kapasitas relatif kecil kadang penggunaan mesin diesel (PLTD) dinilai lebih ekonomis sekalipun biaya bahan bakarnya cukup mahal.

Pembangkit jenis lain yang belakangan ini dikembangkan untuk mengurangi pemanasan global dan polusi udara adalah pembangkit yang menggunakan sumber energi terbarukan. Pada pembangkit jenis ini tidak lagi ada pembakaran bahan bakar fosil yang berdampak pemanasan global dan polusi udara. Termasuk dalam jenis pembangkit ini adalah pembangkit listrik tenaga pasu bumi (PLTP), pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Pembangkit listrik tenaga angin atau bayu (PLTB) menggunakan tenaga angin untuk memutar kincir angin. Pembangkit listrik tenaga panas bumi menggunakan uap panas yang berasal dari dalam perut bumi untuk memutar turbin atau untuk memanaskan air seperti pada PLTU. Sedangkan PLTS menggunakan sel surya

untuk mengubah energi panas matahari menjadi energi listrik. Masing-masing jenis pembangkit mempunyai sifat dan karakteristik yang berbeda-beda, sehingga pembangunannya disesuaikan dengan keadaan dan kebutuhannya.

Beberapa jenis pembangkit dapat diklasifikasikan menurut jenis energi primernya atau menurut proses konversi energinya. Sesuai jenis energi primernya, ada yang menggunakan energi fosil, seperti batubara, minyak dan gas alam. Ada yang menggunakan energi terbarukan, seperti panas bumi, air, angin dan panas matahari.

Menurut jenis prosesnya, ada pembangkit termis dan pembangkit non termis.

### **Pembangkit Termis**

1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
2. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)
3. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)
4. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)
5. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

### **Pembangkit Non Termis**

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

2. Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB)
3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

## **B. Komponen unit pembangkit tenaga listrik**

Suatu unit pembangkit yang berfungsi untuk mengubah energi primer menjadi energi listrik, memerlukan beberapa komponen utama, yaitu: penggerak mula, generator pembangkit listrik dan trafo *step-up*. Selain itu dibutuhkan perlengkapan lain agar pembangkit dapat beroperasi dengan baik, antara lain peralatan kendali dan peralatan perlindungan atau proteksi.

Penggerak mula berupa turbin yang dilengkapi dengan peralatan konversi energi primernya, berfungsi untuk menghasilkan energi gerak berupa putaran poros. Poros yang berputar selanjutnya digunakan untuk memutar generator. Energi untuk memutar turbin bisa berasal dari air, batubara atau minyak yang dibakar untuk memanaskan air, dapat juga berasal dari panas bumi yang digunakan untuk sumber panas guna membangkitkan uap dari air yang dipanaskan.

Generator merupakan mesin berputar yang berfungsi untuk mengubah energi gerak yang berasal dari putaran turbin menjadi energi listrik. Generator dapat menghasilkan energi listrik dengan prinsip induksi elektro magnetik. Selanjutnya listrik yang dihasilkan siap dikirimkan ke pusat-pusat beban.

Trafo *step-up* berupa peralatan listrik yang terdiri dari kumparan dan inti besi yang dapat menaikkan besaran tegangan listrik berdasar prinsip elektromagnetik dan induksi elektro magnetik. Trafo ini digunakan untuk menaikkan tegangan jika pembangkit dihubungkan dengan saluran transmisi atau jaringan distribusi yang tegangannya lebih tinggi dari tegangan keluaran generator.

Adapun peralatan kendali digunakan untuk mengendalikan proses yang ada di unit pembangkit, misalnya mengendalikan tekanan uap air yang masuk ke turbin uap atau mengendalikan pintu air masuk ke turbin air. Peralatan kendali yang lain yang diperlukan adalah untuk mengendalikan agar tegangan dan frekuensi keluaran generator dapat stabil sesuai yang diinginkan.

Peralatan perlindungan diperlukan untuk melindungi peralatan pada unit pembangkit dari kerusakan akibat

adanya gangguan, baik gangguan luar seperti sambaran petir, gangguan dari dalam misalnya putaran lebih pada generator dan turbin maupun gangguan yang adanya tegangan atau arus lebih pada generator.

### **C. Pertimbangan Pembangunan Sistem Pembangkit**

Pembangunan suatu unit pembangkit perlu mempertimbangkan beberapa hal agar diperoleh suatu unit pembangkit yang dapat bekerja secara optimal sesuai dengan kebutuhan. Beberapa hal tersebut di antaranya:

1. Memprediksikan tersedianya sumber energi primer (air, panas bumi dan bahan bakar), sehingga pembangkit dapat beroperasi untuk jangka waktu yang lama dan kontinuitas operasional pembangkit tersebut dapat terjaga.
2. Tersedianya lahan beserta sarana dan prasarannya, baik untuk pembangkit tenaga listrik itu sendiri berupa sarana transportasi bahan bakar maupun untuk kepentingan penyaluran energi listriknya.



3. Waktu pengoperasian pembangkit tenaga listrik yang akan dibangun, apakah untuk melayani beban puncak atau beban dasar, beban besar atau kecil atau sebagai pembangkit cadangan.
4. Biaya pembangunannya harus dirancang seekonomis mungkin dan diupayakan memakan waktu singkat. Selain itu juga harus dipertimbangkan biaya operasionalnya yang berkaitan dengan biaya pengadaan sumber energi primer.
5. Segi kemudahan dalam pengoperasian, terutama bila pembangkit digunakan untuk melayani beban puncak yang berlangsung harian pada jam-jam tertentu saja. Pemilihan pembangkit juga perlu mempertimbangkan tingkat keandalan, kemudahan dalam pemeliharaan dan umur pakai pembangkit tenaga listrik tersebut harus cukup panjang.
6. Harus dipertimbangkan pula kemungkinan pengembangan atau penambahan kapasitas seiring dengan bertambahnya beban, karena hal ini akan berkaitan dengan kemungkinan perluasan pembangkit.

7. Studi analisis mengenai dampak lingkungan (amdal). Perlu dilakukan analisa dan perhitungan mengenai berbagai dampak yang mungkin akan timbul pada saat pembangunannya dan pada saat pembangkit tenaga listrik tersebut dioperasikan.
8. Berbagai pertimbangan sosial-ekonomi dan lain sebagainya yang mungkin dapat menghambat dalam pelaksanaan pembangunan serta ketika pembangkit tenaga listrik tersebut beroperasi.

#### **D. Prinsip Kerja dan Watak Pembangkit**

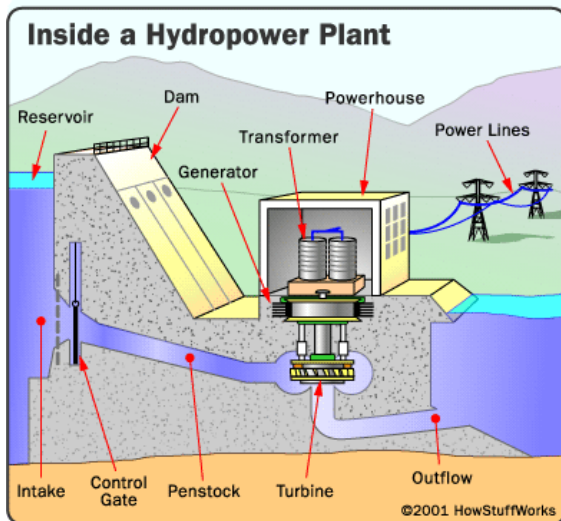
##### **1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)**

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) menggunakan tenaga air sebagai sumber energi untuk memutar turbin, yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator. Energi mekanik berasal dari energi potensial air yang berada pada ketinggian tertentu dalam waduk atau kolam penampungan yang dialirkan melalui pipa-pipa ke sudu-sudu turbin.

Bila dilihat dari posisi poros turbinnya, ada dua jenis PLTA, yaitu PLTA dengan poros turbin horisontal dan PLTA

dengan poros turbin vertikal. Masing-masing disesuaikan dengan keadaan dan lokasi air yang digunakan.

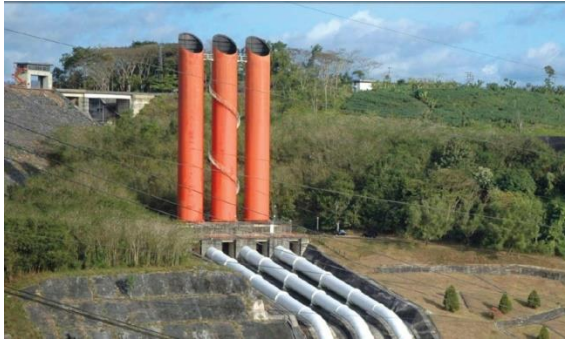
PLTA dengan turbin poros vertikal biasanya digunakan untuk PLTA jenis waduk, sebagai contoh adalah PLTA Sutami atau PLTA Karangates di Malang Jawa Timur. PLTA jenis ini memanfaatkan energi potensial yang terkandung dalam air yang ditampung di waduk yang mempunyai ketinggian tertentu. Skema PLTA jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema PLTA jenis poros vertikal

Prinsip konversi energi yang terjadi pada PLTA jenis ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

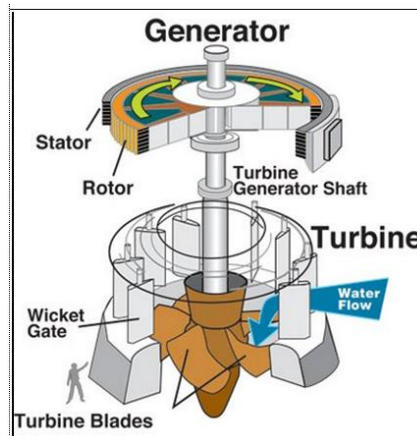
1. Air sungai yang mengalir ditampung pada waduk dengan bendungan agar muka air mempunyai ketinggian yang cukup, sehingga mempunyai energi potensial yang besar. Di dekat waduk pada daerah yang lebih rendah dipasang turbin air.
2. Dari waduk air di alirkan ke turbin melalui pipa pesat ke turbin air. Aliran air masuk diatur sesuai kebutuhan turbin dengan cara mengatur pintu air masuk ke pipa pesat. Pada pipa pesat diperlukan pendatar air yang berupa pipa vertikal terbuka ke atas, berfungsi mengendalikan tekanan pada pipa pesat ketika terjadi kerusakan pada turbin yang mengakibatkan aliran air terhambat. Contoh posisi pipa pendatar seperti tampak pada gambar 2.2.
3. Air yang keluar dari pipa pesat mengalir dengan kecepatan tinggi sehingga mempunyai energi kinetik yang besar untuk memutar turbin air.
4. Poros turbin dihubungkan dengan poros generator, sehingga generator berputar dan menghasilkan energi listrik.



Gambar 2.2 Pipa pendatar di PLTA Sutami Malang

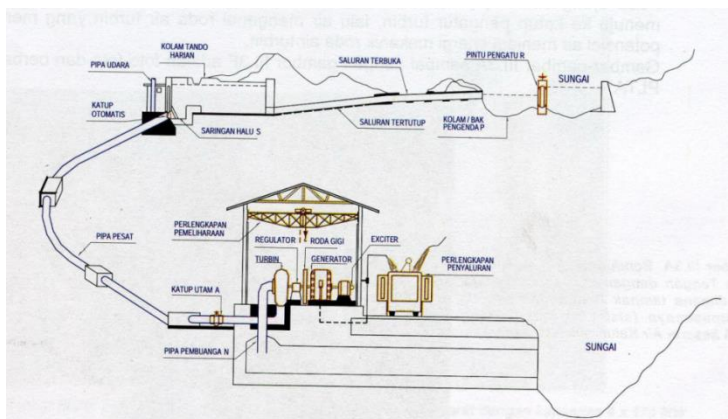
5. Selanjutnya air yang keluar turbin dialirkan kembali ke sungai untuk keperluan pengairan atau untuk keperluan lain.

Salah satu jenis turbin dan generator poros tegak seperti tempakpada gambar 2.3



Gambar 2.3 Turbin dan generator poros tegak

Pembangkit listrik tenaga air jenis lain adalah dengan menggunakan kolam tando. Jenis ini digunakan bila debit air tidak terlalu besar akan tetapi letak hulu sungai cukup tinggi dibanding daerah hilirnya. Pada pembangkit jenis ini, biasanya di hulu sungai yang letaknya cukup tinggi dibangun kolam tando yang kapasitasnya tidak terlalu besar. Dari kolam tando ini sebagian air dialirkan melalui pipa ke daerah yang relatif rendah, sedangkan sebagian lainnya tetap mengalir lewat sungai. Air yang keluar dari pipa ini digunakan untuk memutar turbin yang berada di tempat yang relatif rendah. Secara sekematis bisa dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema PLTA jenis poros horisontal

Pembangkit jenis ini lebih banyak menggunakan turbin dan generator jenis poros horisontal. Contoh dari pembangkit jenis ini adalah PLTA Cirata, Jawa Barat.

Pada PLTA pengendalian daya keluaran dilakukan dengan mengatur pintu air yang masuk ke pipa pesat. Semakin besar debit air yang masuk ke pipa pesat, maka daya keluaran turbin semakin besar, sehingga daya listrik keluaran generator juga semakin besar.

Dibandingkan dengan pembangkit jenis lain, PLTA mempunyai keuntungan biaya operasionalnya relatif murah, akan tetapi pembangunannya sangat tergantung dari ketersediaan sumber air yang cukup banyak dan kontinyu. Disamping itu pembangunannya memerlukan waktu yang lama dan membutuhkan lahan yang luas. PLTA termasuk jenis pembangkit yang pengoperasiannya dapat dilakukan dengan relatif sederhana dan cepat, sehingga dalam waktu yang relatif singkat dapat dihubungkan dengan sistem yang lebih besar. Watak yang demikian ini menjadikan PLTA sering digunakan untuk mendukung beban puncak. Artinya PLTA dioperasikan pada saat beban puncak harian yang biasanya berlangsung beberapa jam saja. Setelah itu beban puncak turun lagi PLTA dapat di non aktifkan. Sekalipun

demikian, pengoperasian PLTA sangat dipengaruhi oleh ketersediaan cadangan air, sehingga perlu dipertimbangkan dengan kebutuhan air yang ada di sekitarnya, misalnya untuk pertanian dan lain-lain.

Secara ringkas watak PLTA digambarkan sebagai berikut:

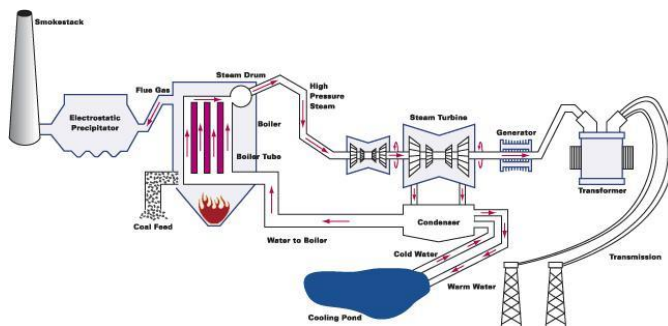
- Pemilihan lokasi tergantung adanya sumber air.
- Pembangunannya butuh waktu lama.
- Umumnya terletak jauh dari perkotaan atau pusat beban.
- Biaya pembangunan relatif besar dan membutuhkan lahan yang luas.
- Biaya operasional relatif rendah.
- Pengoperasian dipengaruhi oleh ketersediaan cadangan air.
- Ramah lingkungan, tidak menimbulkan polusi udara.

## **2. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit thermis yang paling banyak



dipilih untuk pengembangan kapasitas pembangkit di Indonesia. Dikatakan pembangkit thermis karena pembangkit jenis ini dalam mengkonversi energi melalui proses pemanasan dengan suhu tinggi untuk mendapatkan energi yang cukup besar. Pengembangan kapasitas pembangkit jenis ini dapat disesuaikan dengan kebutuhan daya beban dan ketersediaan sumber energi primer. Sumber energi primer yang digunakan untuk PLTU umumnya berupa sumber energi jenis fosil atau hasil tambang, seperti batubara, minyak dan gas alam. Secara garis besar proses konversi energi yang terjadi di PLTU adalah memanaskan air dengan panas yang berasal dari bahan bakar yang dibakar, lalu uap air tekanan tinggi yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin uap. Prinsip kerjanya dapat dipahami sederhana melalui skema yang terlihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema prinsip kerja PLTU

Prinsip kerja PLTU dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Air dipanaskan dalam ketel uap (boiler) hingga menjadi uap yang bersuhu tinggi dan tekanan tinggi.
2. Uap tersebut kemudian dialirkan ke turbin uap untuk memutar turbin.
3. Uap yang keluar dari turbin yang tekanannya sudah relatif rendah di alirkan ke dalam pendingin (kondensor) agar mengembun menjadi airkembali.
4. Air yang dihasilkan kondensordikembalikan ke boiler untuk selanjutnya diuapkan kembali. Demikian seterusnya, sehingga siklus itu akan berlangsung selama pemanasan masih dilakukan.

Pemanasan air pada boiler dapat dilakukan dengan membakar bahan bakar, seperti bahan bakar minyak, batu bara atau bahan bakar lainnya. Sedangkan pendinginan atau pengembunan biasanya menggunakan media pendingin air laut yang disirkulasikan ke ruang pengembunan.

Pada PLTU kapasitas besar, turbin dibuat bersusun mulai turbin tekanan tinggi atau *high pressure turbin* (HPT), kemudian turbin tekanan menengah atau *medium pressure turbin* (MPT) lalu turbin tekanan rendah atau *low pressure*

*turbin* (LPT) untuk memperoleh efisiensi yang lebih tinggi. Poros ketiga turbin tersebut terhubung menjadi satu dengan poros generator, sehingga daya untuk memutar generator merupakan jumlah daya ketiga turbin tersebut. Mula-mula uap panas dari boiler dialirkan ke turbin tekanan tinggi, kemudian uap yang keluar tekanannya lebih rendah digunakan untuk memutar turbin tekanan menengah. Daya yang ada pada uap yang keluar dari turbin tekanan menengah masih dapat digunakan untuk memutar turbin tekanan rendah. Baru setelah keluar dari turbin tekanan rendah, uap diembunkan dalam kondensor.

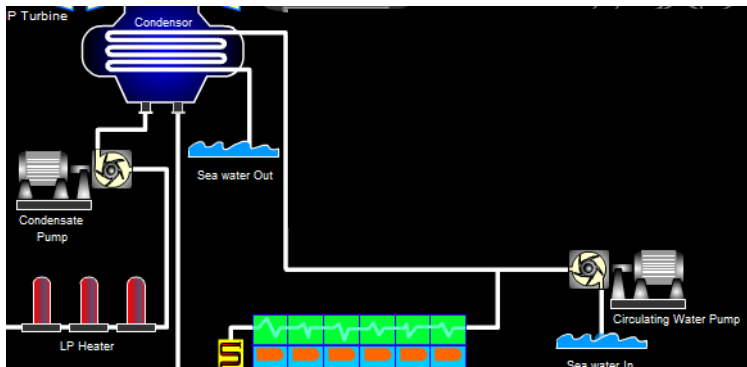
Untuk mengupayakan agar PLTU dapat beroperasi dalam waktu yang lama, perlu dilakukan upaya pencegahan terhadap gangguan, di antaranya adalah gangguan korosi pada pipa uap atau pipa air akibat kandungan zat kimia yang ada pada air. Pencegahan dilakukan dengan cara meminimalisir kandungan zat kimia yang tercampur dalam air sirkulasi. Dengan mengurangi zat kimia yang terkandung dalam air sirkulasi juga dapat memperpanjang umur pakai turbin dan juga mengurangi frekuensi perawatan turbin, karena sudu turbin biasanya terbuat dari bahan logam yang rawan terhadap korosi.

Ciri khas yang ada pada pembangkit listrik tenaga uap adalah perlu adanya cerobong asap yang dibuat cukup tinggi. Cerobong ini digunakan untuk membuang asap sisa pembakaran bahan bakar. Salah satu dampak dari pembakaran bahan bakar adalah polusi berupa udara panas dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Sebelum keluar dari cerobong, asap terlebih dahulu dilewatkan filter atau penyaring agar sisa pembakaran yang berupa padatan carbon dan bahan lain tidak turut keluar, sehingga polusi udara bisa diminimalisir. Penyaringan asap ini dapat menggunakan proses mekanik yaitu diputar dengan kecepatan tinggi, sehingga padatan akan terpisah dan tidak turut keluar ke udara. Dapat juga menggunakan prinsip *electrostatic precipitatory* yaitu dengan cara melewatkan asap pada medan listrik sehingga padatan akan terpisah dan menempel pada elektroda. Cerobong dibuat cukup tinggi agar dampak panas yang timbul tidak begitu mengganggu lingkungan sekitarnya. PLTU kapasitas besar yang dibangun di pulau Jawa di antaranya adalah PLTU Paiton di Jawa Timur dan PLTU Suralaya di Banten.



Gambar 2.6 PLTU batubara Paiton di Jawa Timur

Untuk kepentingan pendinginan pada proses kondensasi atau pengembunan diperlukan air dalam jumlah yang banyak. Air pendingin biasanya diambil dari air laut yang dialirkan ke dalam bak pengembunan, kemudian air yang suhunya relatif tinggi yang keluar dari kondensator dikembalikan ke laut. Karena air laut banyak mengandung garam dan bahan lain yang dapat menyebabkan korosi, maka konstruksi kondensator perlu dirancang menggunakan bahan-bahan yang lebih tahan terhadap korosi.



Gambar 2.7 Kondensator dengan pendingin air laut

Lokasi pembangunan PLTU lebih fleksibel sehingga dapat didekatkan dengan pusat beban, asalkan masih di lokasi pantai untuk memudahkan sirkulasi air laut untuk proses pengembunan uap dan memudahkan transportasi bahan bakar.

Untuk mengoperasikan PLTU mulai dari penyalaan bahan bakar sampai operasi normal memerlukan waktu yang relatif lama. Dengan demikian pembangkit jenis ini biasanya digunakan untuk melayani beban dasar yang beroperasi terus menerus sepanjang hari, tidak sering dinyalakan atau dimatikan.

Karakteristik dan sifat PLTU dapat diringkas sebagai berikut:

- Lokasi pembangunan dapat didekatkan dengan pusat beban sehingga memperkecil biaya penyaluran tenaga listrik.
- Lokasi pembangunan dipilih di pantai untuk mempermudah transportasi bahan bakar dan pengembunan uap.
- Menimbulkan polusi yang berupa udara panas dan CO<sub>2</sub> pada gas buang sisa pembakaran.
- Pembangunan bisa dilakukan dalam waktu yang relatif singkat.
- Layak dibangun untuk kapasitas daya yang relatif besar.
- Biaya operasinal sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar yang digunakan.
- Biaya investasi relatif lebih murah dibanding PLTA
- Waktu yang diperlukan untuk memulai pengoperasian cukup lama, sehingga digunakan untuk melayani beban dasar.

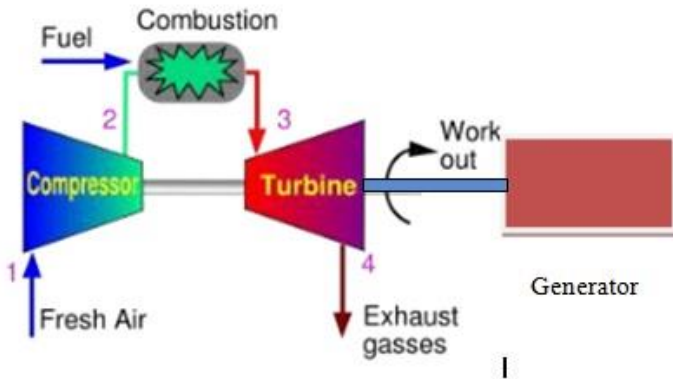
### **3. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)**

Pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan gas bertekanan tinggi hasil pembakaran untuk memutar turbin. Perbedaan pokok PLTG dengan PLTU adalah pada PLTU panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk memanaskan air agar berubah menjadi uap. Uap digunakan untuk memutar turbin, sehingga yang penting proses pembakaran adalah menghasilkan panas yang tinggi. Sedangkan pada PLTG, gas hasil pembakaran langsung digunakan untuk memutar turbin gas tanpa perantara media lain. Dalam sistem ini yang penting gas hasil pembakaran mempunyai tekanan yang tinggi agar dapat memutar turbin dengan daya yang maksimal. Gambaran skematis proses yang terjadi pada PLTG dapat dilihat pada gambar 2.8

Proses konversi energi yang terjadi di PLTG secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Udara segar dimasukkan ke dalam ruang kompresi atau kompresor sehingga mempunyai tekanan yang cukup tinggi, kemudian dimasukkan pada ruang bakar.





Gambar 2.8 Skema proses kerja PLTG

2. Di ruang bakar, pembakaran dilakukan dengan cara menyemprotkan bahan bakar ke ruang bakar bersamaan dengan udara bertekanan tinggi.
3. Gas hasil pembakaran yang mempunyai tekanan tinggi dan suhu tinggi dimasukkan turbin gas untuk memutar turbin.
4. Gas panas yang keluar dari turbin bisa langsung dibuang atau dapat juga di dimanfaatkan untuk memanaskan air dalam boiler pada PLTU.

Bahan bakar pada PLTU dapat berupa bahan bakar gas alam (BBG) atau bahan bakar minyak (BBM). Bila menggunakan BBG, bahan bakar cukup dimasukkan

kedalam ruang bakar bersamaan dengan udara tekanan tinggi dari kompresor, maka dalam ruang bakar akan terjadi pembakaran. Bila menggunakan BBM, maka perlu dilakukan proses pengabutan, yaitu merubah BBM dari keadaan cair menjadi kabut, barulah dimasukkan ke dalam ruang bakar.

PLTG mempunyai keuntungan waktu startnya singkat dibanding dengan PLTU, yaitu segera dapat digunakan setelah dioperasikan. Start PLTU dimulai dengan memutar kompresor dengan mesin diesel. Setelah terjadi pembakaran dan PLTU bekerja normal, maka kompresor tidak lagi diputar dengan mesin diesel, akan tetapi dihubungkan langsung dengan poros turbin. Sebagian tenaga turbin digunakan untuk memutar kompresor. Biaya operasional PLTG relatif tinggi hampir sama dengan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Dengan watak seperti ini, PLTG sering digunakan untuk memasok daya pada saat beban puncak yang hanya berlangsung beberapa jam perhari.

Selain itu, pembangkit tenaga gas merupakan pembangkit yang lebih ramah lingkungan karena tingkat pembakarannya yang hampir sempurna sehingga menghasilkan emisi karbon dioksida dan limbah lain yang

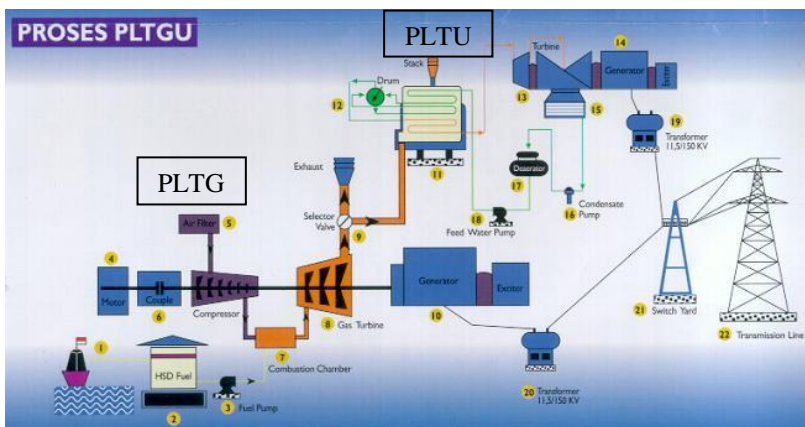
lebih rendah. PLTG lebih layak dibangun untuk kapasitas relatif kecil karena biaya bahan bakar yang cukup tinggi.

Secara ringkas watak atau karakteristik PLTG antara lain:

1. Waktu starting pembangkit relatif singkat.
2. Lokasi pembangkit dapat didekatkan dengan pusat beban, biasanya didekat laut untuk mempermudah transportasi bahan bakar.
3. Biaya operasional relatif tinggi.
4. Lebih banyak digunakan untuk kapasitas dayayang relatif kecil dan untuk melayani beban puncak.
5. Tidak memerlukan lahan yang luas.

Untuk mempertinggi efisiensi unit pembangkit, biasanya PLTG digabung dengan PLTU yang sering disebut pembangkit listrik tenaga gas-uap (PLTGU). Bagian awal PLTGU merupakan satu unit PLTG yang menggunakan bahan bakar gas atau minyak. Gas yang keluar dari turbin gas yang masih bersuhu tinggi digunakan untuk memanaskan air dalam boiler pada bagian akhir PLTGU yang berupa unit PLTU. Penggunaan teknologi *combined cycle* yaitu memanfaatkan gas panas pembuangan dari pembangkit tenaga gas (pembangkit listrik primer) untuk memanasi

airpada PLTGU (pembangkit listrik sekunder) ini menjadikan operasi PLTGU lebih efisien. Contoh unit pembangkit jenis PLTGU adalah pembangkit di Semarang Jawa Tengah.



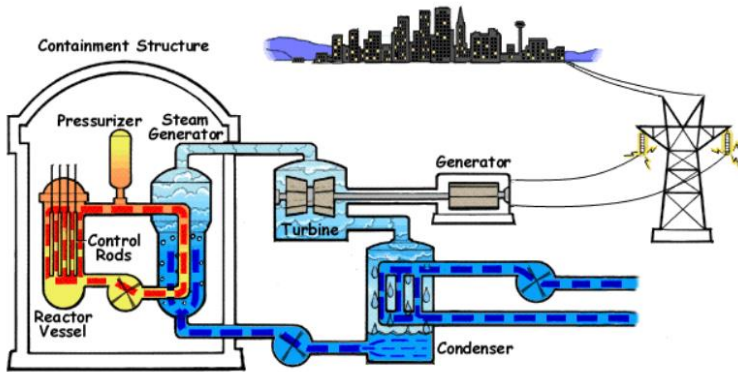
Gambar 2.8 Skema proses kerja PLTGU Semarang

#### 4. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

Pembangkit tenaga listrik kapasitas besar yang banyak dibangun yang biaya operasionalnya relatif murah adalah pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Prinsip kerja PLTN secara garis besar mirip dengan PLTU, hanya saja panas yang diperlukan untuk memanaskan air di boiler menggunakan panas dari hasil reaksi nuklir. Reaksi nuklir

ditempatkan dalam reaktor dengan salah satu bahan bakunya unsur uranium. Yang sering menjadi masalah pada PLTN adalah konstruksi reaktor nuklirnya agar aman bagi lingkungan sekitarnya dari bahaya radiasi yang ditimbulkan oleh reaksi uranium. Selain itu perlu dirancang agar aman dari bahaya kebocoran akibat gangguan alam seperti gempa bumi yang dapat merusak konstruksi reaktor. Masalah lain yang perlu diperhatikan adalah pembuangan sampah nuklir yang juga dapat membahayakan lingkungan.

PLTN memerlukan cerobong yang digunakan untuk pembuangan panas pada kondenser. Cerobong ini biasanya relatif besar karena umumnya PLTN dibangun untuk kapasitas besar. Untuk pembangunan PLTN kapasitas kecil dinilai tidak ekonomis karena biaya pembangunannya relatif besar. Kelebihan lain dari PLTN adalah tidak menimbulkan polusi udara yang berupa CO<sub>2</sub> yang biasa terjadi akibat pembakaran bahan bakar pada pembangkit tenaga fosil. Salah satu PLTN dengan kapasitas besar yang terkenal adalah yang dibangun di Fukushima Jepang. Secara sederhana prinsip kerja PLTN dipaparkan sebagaimana tampak pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Skema proses kerja PLTN

Watak pembangkit listrik tenaga nuklir secara garis besar adalah:

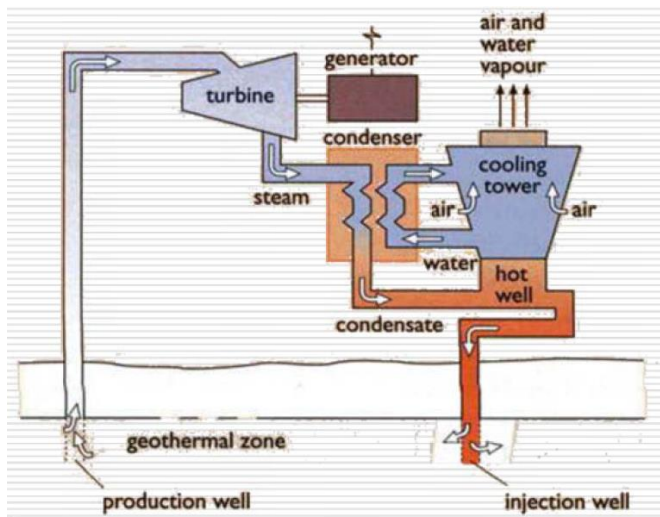
1. Biaya pembangunan relatif besar, hanya layak untuk kapasitas daya besar.
2. Biaya operasional relatif lebih murah.
3. Tidak menimbulkan polusi CO<sub>2</sub> di udara sekitarnya.
4. Resiko keamanan terhadap lingkungan lebih besar berupa bahaya radiasi gelombang radioaktif.
5. Perlu pendinginan yang cukup besar sehingga lebih layak dibangun di pantai.

## 5. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) termasuk jenis pembangkit listrik dengan menggunakan energi terbarukan (EBT). PLTP ini umumnya dibangun di sekitar gunung berapi yang di dalamnya terdapat sumber panas berupa magma. Hal ini karena energi primer yang digunakan berupa uap panas yang diambil dari dalam bumi hasil sirkulasi alami dandiharapkan tidak akan habis. Uap panas ini timbul akibat adanya cadangan air yang ada di bawah lapisan permukaan bumi yang berasal dari resapan air hujan. Cadangan air ini berada di atas batuan yang di bawahnya terdapat magma, sehingga sebagian air berubah menjadi uap panas yang bertekanan tinggi. Uap panas inilah yang digunakan sebagai sumber energi untuk memutar turbin dan selanjutnya memutar generator pembangkit listrik.

Dalam perkembangannya, ada beberapa macam proses konversi energi yang digunakan pada PLTP. Pertama adalah sistem uap kering atau *dry steam system*. Pada PLTU jenis ini, uap air yang keluar dari sumur produksi kondisinya relatif kering (kandungan uap airnya tidak terlalu banyak). Uap panas ini digunakan untuk memutar turbin setelah

sebelumnya dilakukan penyaringan. Penyaringan ini dilakukan untuk memisahkan zat-zat lain dan bara api yang terikut naik dari sumur produksi. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kerusakan sistem pipa dan turbin akibat terkena panas berlebih maupun zat kimia berbahaya. Skema prinsip kerja PLTP tipe uap kering ini tampak pada gambar 2.10.



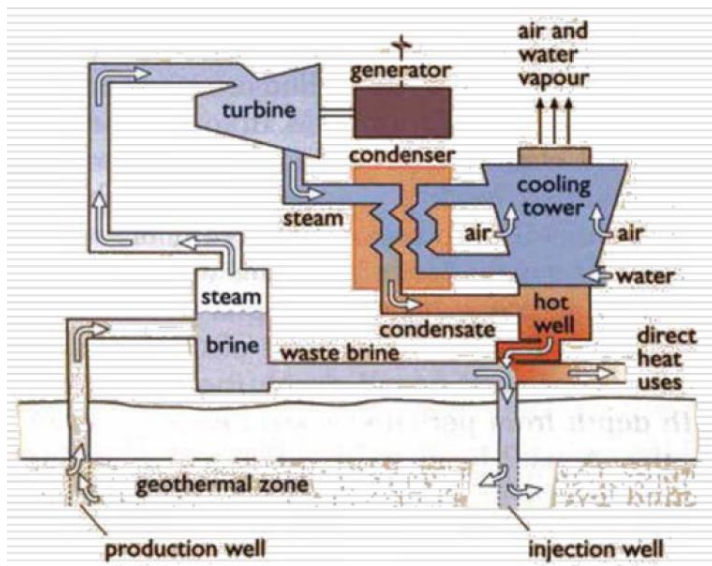
Gambar. 2.10 Skema PLTP dengan uap kering

Uap air yang keluar dari turbin kemudian diembunkan dalam kondenser untuk selanjutnya diinjeksikan lagi ke bumi melalui sumur injeksi. Ini perlu dilakukan untuk mengurangi bahaya akibat ketidak



seimbangan ekosistem di dalam bumi, dan juga untuk mengupayakan agar kondisi uap air yang keluar dari sumur produksi lebih stabil. Untuk kepentingan pengembunan, pendinginan dilakukan dengan air yang disirkulasikan melalui menara pendingin atau *cooling tower*, karena PLTP biasanya dibangun di pegunungan yang jauh dari pantai.

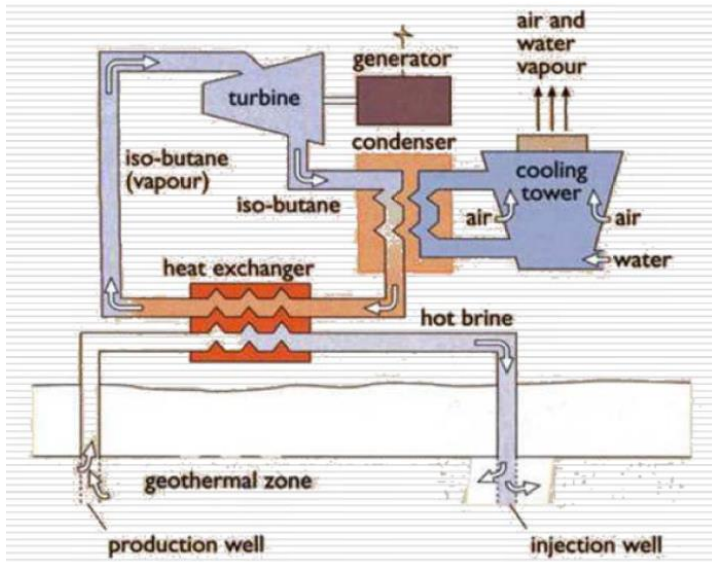
Jenis kedua adalah PLTU, kondisi uap air panas yang keluar dari sumur produksi masih banyak mengandung air atau sering disebut uap basah. Proses pada PLTU jenis uap basah ini dikelompokkan menjadi dua, yaitu: proses sirkulasi tunggal atau *single flash steam power plant* dan proses dengan dua sirkulasi panas yang terpisah atau *binary cycle power plant*. Pada sistem sirkulasi tunggal, uap panas dari sumur langsung digunakan untuk memutar turbin uap setelah kandungan airnya dipisahkan dari uap panas. Kemudian uap yang keluar dari turbin diembunkan, lalu dipompakan kembali ke bumi bersamaan dengan air yang dipisahkan dari uap panas melalui sumur injeksi. Secara sederhana, skema proses *single flash steam power plant* terlihat pada gambar 2.11



Gambar. 2.11 Skema PLTP dengan uap basah *single flash steam power plant*

Sedangkan pada proses jenis *binary cycle power plant*, sirkulasi uap panas yang berasal dari sumur produksi terpisah dengan sirkulasi uap air yang digunakan untuk memutar turbin. Sirkulasi pertama, uap panas yang berasal dari bumi dilewatkan pada media pemindahan panas semacam boiler pada PLTU yang disebut *heat exchanger*, kemudian uap atau gas panas yang keluar dari *heat exchanger* itu dipompakan kembali ke dalam bumi. Sirkulasi kedua adalah sirkulasi air yang berubah menjadi uap akibat pemanasan di *heat exchanger* dialirkan ke turbin untuk

memutar turbin. Setelah keluar dari turbin, uap diembunkan kembali, kemudian dimasukkan lagi ke *heat exchanger* untuk diuapkan. Secara sederhana proses *binary cycle power plant* seperti tampak pada gambar 2. 12



Gambar. 2.12 Skema *binary cycle power plant*

Secara umum watak PLTP dapat diringkas sebagai berikut:

1. Lokasi pembangunan disekitar gunung berapi yang banyak mengandung magma.
2. Biaya pembangunanya mahal terutama proses pengeboran.

3. Sangat perlu pertimbangan terjadinya kerusakan lingkungan dan ekosistem.
4. Biaya operasional relatif murah.
5. Tidak banyak dampak polusi udara karena tidak ada pembakaran bahan bakar.

## **6. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)**

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel atau PLTD merupakan jenis pembangkit listrik yang konstruksinya paling sederhana. Bagian utama pembangkit jenis ini berupa sebuah mesin diesel berbahan bakar minyak yang digunakan untuk memutar generator pembangkit listrik yang porosnya dihubungkan dengan poros mesin diesel. Lokasi pembangunan PLTD biasanya dipilih yang terdekat dengan beban selama transportasi BBM masih terjangkau.

Kelebihan dari PLTD dibanding dengan jenis pembangkit yang lain yang telah dibahas terdahulu, bahwa PLTD lebih layak untuk dibangun di lokasi yang kebutuhan bebannya masih relatif kecil. Biaya pembangunan PLTD relatif lebih murah dan waktu pembangunannya lebih singkat. Dengan demikian pembangkit jenis ini sering

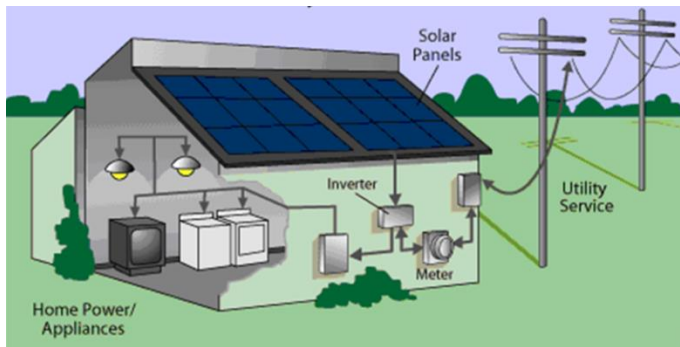
menjadi pilihan untuk melayani beban di wilayah yang kebutuhan daya listriknya relatif kecil, dan daerah yang beban-beban listriknya tersebar di tempat yang berjauhan, seperti di sebagian besar wilayah Indonesia Timur. Hanya saja biaya operasionalnya cukup tinggi karena menggunakan BBM, lebih tinggi dari pembangkit tenaga gas, sehingga kurang ekonomis. Hal ini menjadikan biaya pokok penyediaan (BPP) energi listrik di wilayah Indonesia Timur relatif tinggi. Kelebihan lain PLTD adalah waktu yang diperlukan untuk *start* hingga dapat beroperasi normal sangat singkat.

Watak PLTD secara ringkas antara lain:

- Biaya pembangunan relatif ringan.
- Pembangunannya lebih cepat.
- Letaknya dapat didekatkan pusat beban.
- Segera bisa digunakan setelah start.
- Biaya operasional cukup tinggi.
- Biasanya untuk daya relatif kecil.
- Untuk melayani beban puncak atau beban di daerah terpencil.

## 7. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) merupakan jenis pembangkit energi terbarukan yang dikembangkan untuk mengatasi problem kesulitan pengadaan tenaga listrik di daerah terpencil. PLTS merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang tidak menggunakan generator sebagaimana pembangkit yang lain. Peralatan utama pembangkit jenis ini adalah sel surya atau *photo voltaic*, yaitu berupa lempengan logam yang terbuat dari dua macam bahan semikonduktor yang dapat mengubah energi panas matahari menjadi energi listrik. Pemasangan dan pengoperasian sel surya ini tergolong paling mudah, karena tidak ada mesin yang berputar dan tidak ada pembakaran. Hanya saja harga sel surya yang masih relatif tinggi dan efisiensi dayanya masih relatif rendah, sekitar 10 %. Sehingga pemakaian PLTS kebanyakan dibangun dalam kapasitas kecil dan digunakan untuk alternatif penyelesaian kelangkaan energi listrik di daerah terpencil. Biaya pembangunan PLTS kapasitas besar sangat mahal. PLTS untuk kepentingan rumah tangga penggunaannya bisa digabungkan dengan jaringan listrik sumber lain seperti tampak pada gambar 2.13.

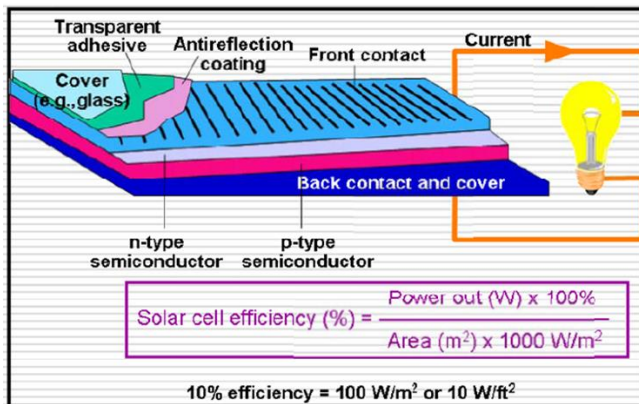


Gambar 2.13 Instalasi PLTS yang digabung dengan jaringan listrik lain.

Prinsip kerja dari PLTS adalah memanfaatkan energi panas matahari untuk memanaskan sel surya. Sel surya pada prinsipnya tersusun dari dua lapis bahan semi konduktor yang berbeda jenisnya. Bila sel ini terkena panas matahari, maka terjadi beda potensial atau beda tegangan antara kedua lapisan bahan itu. Tinggi rendahnya tegangan yang timbul pada sel surya tergantung intensitas cahaya matahari yang mengenainya. Beda tegangan yang timbul antara dua bahan tersebut relatif rendah, sehingga untuk mendapatkan beda tegangan yang lebih tinggi, maka sel-sel tersebut dipasang seri. Sedangkan untuk mendapatkan daya listrik yang lebih besar, sel-sel tersebut di pasang paralel. Dalam prakteknya sel surya terdiri dari banyak sel yang dirangkai secara seri dan paralel membentuk panel surya

untuk mendapatkan daya yang cukup besar dan tegangan yang lebih tinggi.

Sel surya hanya menghasilkan energi listrik ketika terkena sinar matahari atau pada siang hari saja. Agar dapat dimanfaatkan sewaktu-waktu, energi listrik yang dihasilkan sel surya perlu disimpan pada baterai. Baterai ini kemudian dipakai sebagai sumber energi listrik yang dihubungkan dengan beban. Sebagai pelengkap pembangkit listrik dengan sel surya diperlukan peralatan pengatur tegangan agar diperoleh tegangan yang stabil karena tegangan output sel surya kadang rendah kadang tinggi sesuai dengan intensitas cahaya matahari. Bagian-bagian sel surya pada PLTS secara sederhana ditunjukkan pada gambar 2.14

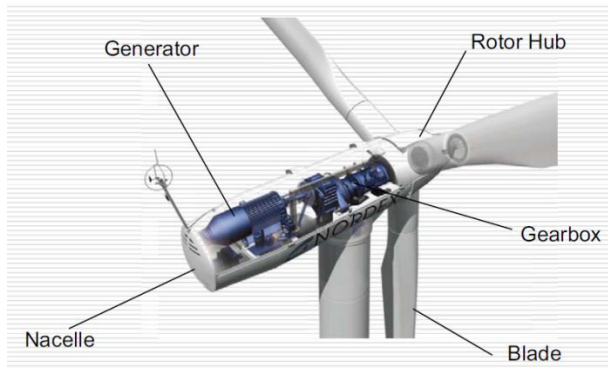


Gambar 2.14 Bagian-bagian dari sel surya



## 8. Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB)

Pada pembangkit listrik tenaga angin, energi yang digunakan untuk memutar generator berasal dari energi angin. Angin yang mempunyai kecepatan cukup tinggi digunakan untuk memutar kincir yang porosnya dihubungkan dengan poros generator. Jenis pembangkit ini tentunya lebih cocok pada daerah-daerah yang kecepatan anginnya cukup tinggi yang biasanya berada di daerah pantai. Kecepatan angin di suatu tempat biasanya berubah-ubah dari waktu ke waktu, begitu juga arahnya. Sehingga untuk mendapatkan putaran kincir yang stabil diperlukan peralatan pengatur putaran berupa kombinasi roda gigi.



Gambar 2.15 Bagian-bagian kincir angin pada PLTB

Selain itu dibutuhkan peralatan untuk mengatur agar kincir selalu menghadap ke arah datangnya angin sehingga memperoleh daya putar maksimal. Bagian-bagian kincir angin secara garis besar ditunjukkan pada gambar 2.15

Seperti halnya PLTS, pada PLTB juga diperlukan adanya alat penyimpan energi dan pengatur tegangan, karena kecepatan angin dapat sewaktu-waktu berubah, sehingga penggunaan energi dapat diatur sesuai kebutuhan.

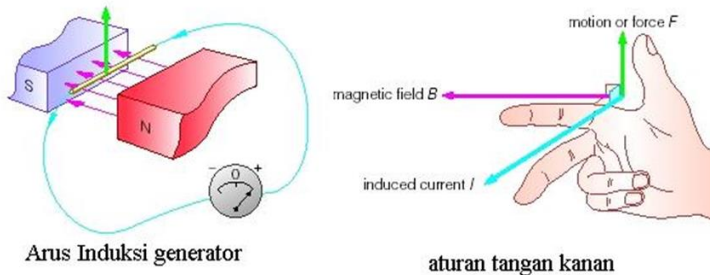
### **E. Generator Pembangkit**

Generator merupakan komponen yang sangat menentukan watak suatu sistem pembangkit listrik. Generator adalah mesin listrik yang terdiri dari dua bagian utama, yaitu bagian yang berputar yang disebut rotor dan bagian yang diam yang disebut stator. Generator berfungsi untuk mengubah energi kinetik yang berupa putaran turbin menjadi energi listrik yang siap disalurkan ke beban-beban listrik. Pada pembangkit listrik, poros generator dihubungkan dengan poros turbin, sehingga putaran generator mengikuti putaran turbin. Pengaturan putaran generator dilakukan dengan mengatur putaran

turbin. Putaran turbin diatur dengan mengatur suplai uap atau gas yang masuk ke generator.

## 1. Prinsip kerja generator

Generator pembangkit listrik bekerja berdasar prinsip induksi elektro magnetik. Gejala induksi elektro magnetik merupakan gejala timbulnya beda tegangan antara kedua ujung kumparan yang terkena medan magnet yang berubah-ubah. Secara sederhana, induksi elektromagnetik dapat dijelaskan dengan bantuan gambar 2. 16.



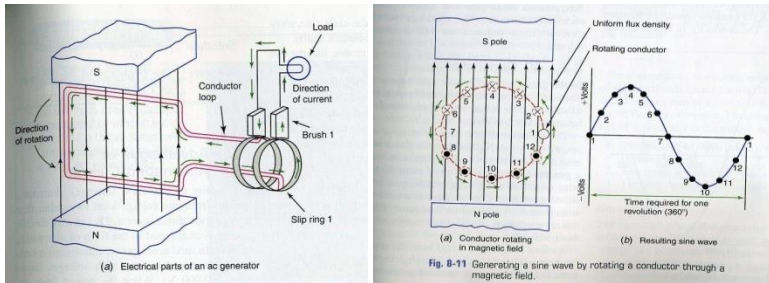
Gambar 2.16 Gejala induksi elektromagnetik

Bila dua buah kutub magnet utara dan kutub selatan diletakkan berdekatan, maka pada ruang antara kedua kutub tersebut akan muncul garis gaya magnet yang arahnya dari kutub utara ke kutub selatan.

1. Bila sebuah konduktor digerakkan dalam ruang antara kedua kutub tersebut tegak lurus arah medan magnet, maka konduktor akan memotong garis-garis gaya magnet dan mengakibatkan adanya beda tegangan antara kedua ujung konduktor tersebut. Gejala inilah yang disebut induksi elektro magnetik.
2. Kemudian bila kedua ujung konduktor tersebut dirangkai tertutup, maka pada konduktor akan mengalir arus yang arahnya tertentu seperti digambarkan pada gambar 2.16. Hubungan antara arah garis gaya magnet, arah gerakan dan arah arus induksi dapat digambarkan dengan kaidah tangan kanan.

## **2. Prinsip kerja generator AC**

Pada generator AC, secara prinsip terdiri dari konduktor berbentuk kumparan yang diputar di antara dua kutub magnet utara dan kutub selatan. Kemudian kedua ujung kumparan dihubungkan ke beban melalui cincin geser atau *slip-ring* sebagaimana tampak pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Skema prinsip rangkaian generator AC

Bila kumparan tersebut digerakkan atau diputar, maka pada kumparan akan timbul tegangan induksi. Karena kumparan dan beban merupakan rangkaian tertutup, maka pada rangkaian itu akan mengalir arus induksi ke beban, sedangkan arah arus akan bolak-balik bergantian. Pada konduktor yang berada pada sisi atas akan mengalir ke kiri, dan pada konduktor yang berada pada sisi bawah mengalir arus ke kanan. Pada saat yang lain, ketika konduktor yang awalnya berada pada sisi atas berputar ke posisi di bawah, maka arus mengalir ke kanan, dan pada konduktor sisi yang lain berada di atas akan mengalir arus ke kiri. Demikian seterusnya, sehingga ketika lilitan itu diputar dengan kecepatan putar tertentu, maka arah arus akan selalu bergantian setiap periode tertentu. Demikian juga tegangannya keluarannya, sebagaimana terlihat pada gambar sebelah kanan.

Pada generator dengan kapasitas kecil umumnya digunakan magnet permanen agar konstruksi lebih sederhana. Contoh yang paling banyak ditemui adalah pada generator sepeda kayuh atau sering disebut dinamo sepeda.

### **3. Generator sinkron**

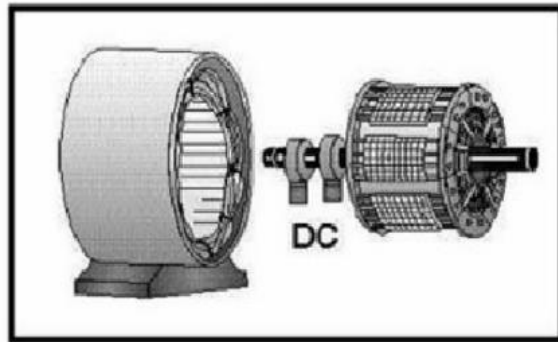
Kapasitas generator di unit pembangkit umumnya relatif besar, yang tentunya arus yang mengalir pun besar. Konsekuensinya ukuran konduktor yang dialiri arus induksi ke beban juga cukup besar dan menjadi cukup berat. Oleh karena itu kumparan untuk mengalirkan arus induksi bukan lagi ditempatkan pada rotor yang diputar, akan tetapi berada pada bagian yang diam (stator), sedangkan magnet yang relatif ringan ditempatkan pada rotor.

Untuk generator kapasitas besar, medan magnet pada rotor bukan lagi dari magnet permanen, tetapi menggunakan elektro magnet, yaitu medan magnet yang dibangkitkan dari arus listrik yang dialirkan pada kumparan. Dengan demikian kekuatan medan magnetnya dapat diatur. Rotor pembangkit medan magnet berupa kumparan yang dialiri arus listrik searah dan didalamnya dipasang inti besi. Konstruksi generator semacam ini disebut generator sinkron atau generator serempak.

#### 4. Prinsip kerja generator sinkron

Secara singkat prinsip kerja generator sinkron dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Generator sinkron terdiri dari dua bagian, stator berupa kumparan yang berfungsi membangkitkan tegangan dan arus induksi, dan rotor yang berupa kumparan magnet yang berfungsi membangkitkan medan magnet sebagaimana tampak pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Konstruksi sederhana generator sinkron

2. Kumparan rotor dialiri listrik arus searah (DC), sehingga timbul medan magnet di sekitar kumparan. Besar kuat medannya dipengaruhi oleh jumlah lilitan dan kuat arus yang mengalir.

3. Rotor diputar sehingga medan magnet yang timbul pada rotor turut berputar mengikuti putaran rotor.
4. Medan magnet pada rotor yang berputar akan mengenai kumparan stator, sehingga pada kumparan stator timbul tegangan induksi.
5. Bila kedua ujung kumparan stator dihubungkan dengan beban, maka akan mengalir arus bolak-balik ke beban.

Bila kumparan statornya hanya terdiri satu pasang kumparan yang diletakkan berhadapan, maka generator tersebut akan menghasilkan tegangan bolak-balik satu fasa, yaitu tegangan yang berbentuk gelombang sinusoidal dengan frekuensi tertentu sesuai dengan kecepatan putaran poros. Generator sinkron semacam ini disebut generator sinkron satu fasa.

Bila kumparan statornya terdiri dari tiga pasang kumparan yang masing-masing dipasang dengan bedasudut 120 derajat, kemudian salah satu ujung masing-masing kumparan digabung, maka pada ujung-ujung terminal output generator akan timbul gelombang tegangan bolak-balik yang masing-masing berbeda 120 derajat, yang disebut

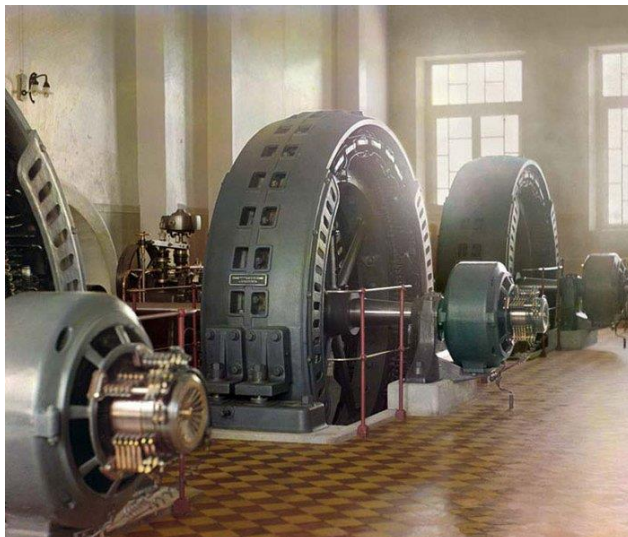


tegangan bolak-balik tiga fasa. Generator sinkron semacam ini disebut generator sinkron tiga fasa.

Pada unit pembangkit digunakan generator AC karena listrik arus bolak-balik mempunyai kelebihan lebih mudah untuk dinaikkan atau diturunkan sesuai kebutuhan daripada listrik DC. Untuk pembangkit yang berkapasitas besar biasanya digunakan generator AC sinkron 3 fase. Generator sinkron 3 fase mempunyai kelebihan mempunyai kapasitas daya yang lebih besar dibanding dengan generator sinkron 1 fase untuk ukuran generator yang sama. Generator sinkron mempunyai keuntungan pengaturan tegangan dan frekuensi keluarannya lebih sederhana dibanding jenis generator yang lain.

Arus listrik DC untuk kumparan rotor pada generator sinkron bersumber dari generator yang disebut pilot generator yang dipasang satu poros dengan generator utama. Sebelum masuk ke kumparan medan rotor, tegangan dan arus diatur dengan peralatan regulator. Pengaturan arus searah yang masuk kumparan rotor ini dilakukan untuk mengatur besar fluks magnet yang timbul dan selanjutnya mempengaruhi tegangan keluaran generator. Salah satu

gambaran posisi pilot generator pada generator sinkron dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Pilot generator pada generator sinkron

## **5. Watak generator sinkron**

Pada dasarnya generator sinkron mempunyai dua watak yang sangat diperlukan dalam pengoperasiannya, yaitu watak tegangan output dan watak frekuensinya. Nilai frekuensi dan tegangan keluaran pembangkit diupayakan agar stabil.

Tegangan output generator sinkron nilainya sebanding dengan putaran generator dan jumlah fluks

magnet yang dihasilkan kumparan rotornya. Selain itu juga dipengaruhi oleh konstanta mesin yang nilainya sesuai spesifikasi mesin. Tegangan yang timbul pada kedua terminal output generator dirumuskan sebagai:  $E = C n \phi$

dengan         $E$  : tegangan output generator

$n$  : putaran rotor (rpm)

$\phi$  : fluks yang dihasilkan kumparan rotor

$C$  : konstantan mesin

Semakin tinggi kecepatan putaran poros generator, maka tegangan keluaran juga semakin naik, dan sebaliknya. Semakin besar fluks yang dihasilkan kumparan medan akan mengakibatkan tegangan output pada kumparan stator bertambah tinggi, dan sebaliknya. Tegangan output generator selain dipengaruhi oleh besarnya fluks magnet dan putaran generator, juga dipengaruhi oleh arus beban. Semakin besar arus beban, maka tegangan output generator semakin rendah karena adanya turun tegangan pada kumparan stator, dan demikian juga sebaliknya.

Besarnya medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada kumparan itu. Semakin besar arus yang mengalir, maka fluks magnet yang dihasilkan akan semakin besar. Ketika

generator beroperasi selalu diupayakan agar tegangan generator stabil. Dengan demikian untuk mengatur tegangan output generator stabil, dapat dilakukan salah satunya dengan mengatur arus yang masuk ke kumparan medan pada rotor. Pengaturan arus medan dilakukan dengan cara merubah resistor variabel yang dipasang pada rangkaian kumparan rotor tersebut, baik dengan cara manual maupun otomatis.

Sedang frekuensi tegangan output generator dipengaruhi oleh putaran poros dan jumlah pasangan kutub magnet rotornya. Frekuensi tegangan output generator sinkron dirumuskan dengan:  $f = (n \times p) / 120$

dengan  $f$  : frekuensi tegangan output generator

$n$  : putaran rotor (rpm)

$p$  : jumlah pasangan kutub kumparan rotor

Putaran generator dipengaruhi oleh putaran turbin. Putaran turbin dipengaruhi oleh suplai uap, gas atau air yang masuk ke turbin tersebut. Selain ini putaran turbin juga dipengaruhi oleh daya beban. Semakin besar daya beban akan mengakibatkan putaran turbin menjadi lebih lambat, dan juga sebaliknya. Putaran turbin yang semakin lambat akan mengakibatkan putaran generator semakin lambat juga

sehingga frekuensi tegangan keluaran generator semakin rendah, dan sebaliknya.

Oleh karena perubahan putaran akan mengakibatkan perubahan frekuensi gelombang outputnya, maka perubahan putaran dan perubahan arus yang masuk ke kumparan rotor perlu diselaraskan agar diperoleh tegangan dan frekuensi output yang nilainya masih memenuhi batas toleransi.

## **LATIHAN**

1. Jelaskan dengan skema atau gambar dan penjelasan singkat prinsip kerja PLTU
2. PLTU biasanya dibangun di daerah pantai, mengapa demikian?
3. Hal apa saja yang perlu dipertimbangkan sebelum melakukan pembangunan Pusat pembangkit listrik, berilah contoh pembangkit listrik tenaga air.
4. Sebutkan perbedaan pokok antara PLTD dengan PLTG yang keduanya menggunakan BBM.
5. Jelaskan secara singkat prinsip kerja generator pembangkit listrik.



## **BAB III**

### **SALURAN TRANSMISI**

Pada sistem tenaga listrik, energi listrik yang dibangkitkan oleh generator selanjutnya dikirimkan ke beban atau pusat-pusat beban untuk dimanfaatkan. Lokasi pusat beban kadang terletak jauh dari pusat pembangkit. Untuk menyalurkan energi listrik tersebut ke pusat beban diperlukan sarana yang mampu mengirimkan energi yang cukup besar dengan seekonomis mungkin. Komponen sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ini dinamakan saluran transmisi.

#### **A. Pengertian dan macamnya**

Saluran transmisi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa sejumlah konduktor yang dipasang membentang sepanjang jarak antara pusat pembangkit sampai pusat beban atau antar gardu induk. Saluran transmisi berfungsi untuk mengirimkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban atau mengirimkan energi listrik dari satu gardu induk ke gardu induk yang lain. Saluran transmisi biasanya digunakan untuk

mengirimkan daya listrik yang cukup besar untuk jarak yang relatif jauh.

Pemilihan jenis saluran transmisi sangat ditentukan oleh jumlah energi yang akan disalurkan dan jarak atau panjang saluran transmisinya. Saluran transmisi, pada prinsipnya untuk menyalurkan daya listrik dengan jumlah tertentu, semakin tinggi level tegangan yang digunakan, arus yang mengalir akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya, sesuai dengan rumus:

$$P = V \times I$$

dimana P : daya yang dikirimkan

V : tegangan saluran

I : Arus yang mengalir pada saluran

Dengan cara menaikkan level tegangan, maka arus yang mengalir pada saluran menjadi lebih kecil. Selanjutnya drop tegangan pada saluran transmisi menjadi semakin kecil, sesuai rumus :  $V_{\text{drop}} = I \times Z$ ,dimana Z adalah impedansi saluran.

Demikian juga dengan semakin kecil arus yang mengalir pada saluran, diharapkan rugi-rugi daya pada



saluran semakin kecil, sesuai rumus:  $P = I^2 \times R$ , dimana R adalah resistansi saluran.

Semakin tinggi level tegangan saluran transmisi tentunya biaya pembangunannya lebih mahal, karena harus menggunakan tower yang lebih tinggi dan kekuatan isolasinya juga lebih besar. Demikian juga peralatan-peralatan lain yang digunakan pada gardu induknya.

Dengan pertimbangan di atas, saluran transmisi dengan level tegangan yang lebih tinggi hanya layak digunakan untuk menyalurkan daya yang relatif lebih besar dan jarak yang relatif jauh. Kenaikan biaya pembangunan bisa terimbangi dengan manfaat berkurangnya turun tegangan dan rugi-rugi daya yang terjadi pada saluran.

Ada beberapa macam saluran transmisi yang masing-masing mempunyai kekurangan dan kelebihan. Penggunaan masing-masing jenis disesuaikan dengan keadaan agar diperoleh pengiriman daya yang paling ekonomis dan aman bagi lingkungan sekitarnya. Saluran transmisi bisa dikelompokkan berdasar tegangan kerjanya, dapat juga dikelompokkan berdasar penempatan konduktornya, atau berdasar jenis arus listrik yang disalurkan.

## 1. Klasifikasi saluran transmisi berdasar penempatan konduktornya

Berdasar penempatan konduktornya, saluran transmisi dikelompokkan menjadi tiga, saluran udara atau *overhead transmission line*, saluran bawah tanah atau *under ground transmission line* dan saluran bawah laut atau *submarine transmission line*. Penjelasan ketiga macam saluran transmisi tersebut adalah:

**Saluran udara** berupa kawat penghantar atau konduktor telanjang (tanpa isolasi) yang digantung dengan ketinggian tertentu pada tower dengan menggunakan isolator gantung. Saluran udara ini merupakan jenis saluran transmisi yang paling banyak digunakan karena dinilai paling ekonomis. Biaya pembangunan saluran udara relatif lebih murah, pemeliharaan dan pengawasannya lebih sederhana. Hanya saja saluran udara ini lebih rawan terhadap gangguan cuaca, baik gangguan petir maupun angin kencang. Juga saat pembangunannya kadang berbenturan dengan masalah sosial masyarakat yang khawatir terkena radiasi tegangan terutama tegangan ekstra tinggi. Contoh bentuk saluran transmisi udara tampak pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Saluran transmisi jenis saluran udara

**Saluran bawah tanah** berupakabel atau konduktor berisolasi yang diletakkan dalam tanah dengan kedalaman tertentu. Pembangunan saluran jenis ini memerlukan biaya yang lebih tinggi dibanding saluran udara karena harga kabel berisolasi harganya jauh lebih tinggi dibanding kawat telanjang. Juga untuk pemasangan dan perbaikan saluran bila terjadi gangguan lebih rumit. Saluran jenis ini mempunyai kelebihan lebih aman terhadap gangguan cuaca dan tidak mengganggu pemandangan. Saluran ini biasanya digunakan di perkotaan ketika pembangunan saluran udara sulit dilakukan. Contoh pemasangan kabel saluran transmisi bawah tanah tampak pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Contoh pemasangan kabel saluran transmisi bawah tanah

**Saluran bawah laut** merupakan kabel atau konduktor berisolasi yang diletakkan di dasar laut. Saluran transmisi jenis ini jarang digunakan karena harga kabel laut dan biaya pemasangannya yang tinggi. Harga kabel laut lebih tinggi karena diperlukan isolasi yang sangat kuat karena harus mampu menahan gangguan mekanis maupun kimiawi yang ada di dalam laut. Dengan demikian penggunaan kabel laut ini hanya pada keadaan yang tidak memungkinkan penggunaan saluran transmisi jenis lain. Contoh saluran transmisi bawah laut tampak pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Saluran transmisi bawah laut

Dari ketiga jenis ini, yang paling banyak digunakan adalah saluran udara karena dinilai paling ekonomis. Saluran udara menggunakan penghantar yang telanjang atau tidak berisolasi, sedang jenis yang lain harus menggunakan kabel atau penghantar berisolasi. Penghantar merupakan komponen pokok dari saluran transmisi, sehingga biaya pembangunannya sangat dipengaruhi oleh jenis penghantar yang digunakan. Pada saluran bawah tanah dan saluran bawah laut, kekuatan fisik maupun listrik isolasi penghantar merupakan hal yang sangat penting, karena bila terjadi kerusakan atau kebocoran akan sangat membahayakan lingkungan di sekitarnya. Sedangkan pada saluran udara, yang penting adalah memenuhi batas

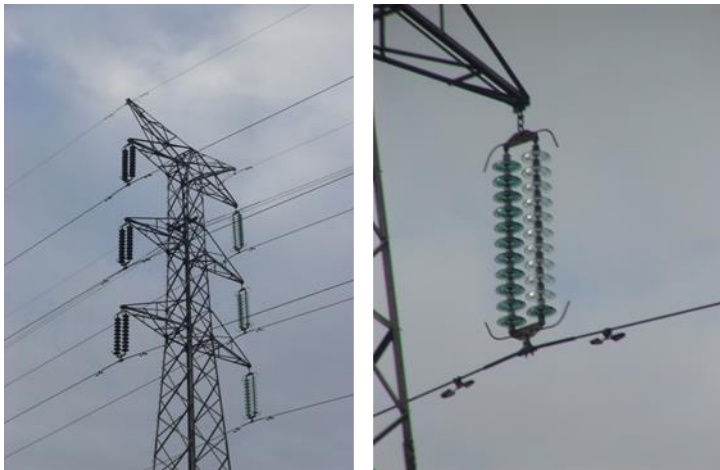
minimum ketinggian saluran, sehingga pengaruh medan listrik dan medan magnet yang ditimbulkan tidak membahayakan penghuni atau lingkungan yang ada di bawah saluran tersebut.

## **2. Klasifikasi saluran transmisi berdasarkan tegangan kerjanya**

Berdasarkan tegangan kerjanya, saluran transmisi dikelompokkan menjadi tiga, yaitu saluran transmisi tegangan tinggi, saluran transmisi tegangan ekstra tinggi dan saluran transmisi tegangan ultra tinggi. Dalam bahasan ini yang dijelaskan hanya untuk saluran udara. Penjelasan, kelebihan dan kekurangan masing-masing adalah sebagai berikut:

**Saluran udara tegangan tinggi (SUTT)** menggunakan level tegangan tinggi yang berkisar antara 70 kV hingga 245 kV. Biaya pembangunan SUTT relatif lebih murah dibandingkan saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET). Ini dikarenakan level tegangannya lebih rendah, sehingga isolator yang digunakan lebih pendek dan tower juga lebih pendek. SUTT lebih layak digunakan bila daya yang dikirimkan tidak begitu besar dan jarak pengirimannya tidak begitu jauh. Karena semakin besar daya yang dikirim,

maka arus yang mengalir akan semakin besar yang mengakibatkan rugi daya saluran semakin besar dan drop tegangannya menjadi semakin besar. Semakin jauh jarak pengiriman akan mengakibatkan impedansi penghantar semakin besar dan akan menambah drop tegangan. SUTT banyak digunakan untuk menyalurkan daya antar kota yang dayanya relatif kecil. Bentuk SUTT dan isolator gantung yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Saluran udara tegangan tinggi dan isolator

**Saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET)** menggunakan level tegangan lebih dari 275 kV sampai 700 kV. Untuk menyalurkan daya listrik yang lebih besar diperlukan saluran transmisi dengan level tegangan yang

lebih tinggi. SUTET merupakan saluran transmisi yang lebih ekonomis dibanding dengan SUTT bila digunakan untuk menyalurkan daya yang lebih besar. SUTET mempunyai kapasitas menghantarkan daya listrik yang lebih besar dibanding SUTT untuk ukuran kawat penghantar yang sama. Dengan menaikkan level tegangan, maka arus yang mengalir pada saluran menjadi semakin kecil, karena untuk mengirim daya tertentu, arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangannya.

Keuntungan yang diharapkan dengan arus yang lebih kecil adalah rugi daya saluran menjadi lebih kecil dan drop tegangan juga menjadi lebih kecil. Hanya saja karena tegangan pada SUTET lebih tinggi dibanding SUTT, maka isolatornya perlu lebih panjang dan tower perlu lebih tinggi agar tetap aman bagi lingkungan sekitar saluran, sehingga biaya pembangunannya menjadi lebih mahal. Selain itu SUTET memerlukan trafo penaik dan penurun tegangan dengan tegangannya lebih tinggi, sehingga menambah biaya pembangunan sistem. SUTET lebih ekonomis bila digunakan untuk mengirimkan daya dengan kapasitas yang lebih besar, misalnya pada sistem interkoneksi kelistrikan Jawa-



Bali. Bentuk SUTET dan isolator gantung yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Saluran udara tegangan ekstra tinggi dan isolator gantung

**Saluran udara tegangan ultra tinggi (SUTUT)** menggunakan level tegangan yang lebih tinggi mulai 750 kV. Biaya pembangunan SUTUT tentunya lebih mahal dibandingkan SUTT dan SUTET. SUTUT akan lebih ekonomis jika daya yang dikirim lebih besar lagi dan jarak pengirimannya lebih jauh lagi. SUTUT dikembangkan dan digunakan untuk menyalurkan daya dengan kapasitas besar di wilayah daratan China dan Amerika yang jaraknya cukup jauh.



Gambar 3.6 Saluran udara tegangan ultra tinggi

### **3. Klasifikasi saluran transmisi berdasarjenis arus listrik yang disalurkan**

Berdasar jenis arus listrik yang disalurkan, ada dua macam saluran transmisi yaitu saluran transmisi arus bolak-balikdan saluran transmisi arussearah.

**Saluran transmisi arus bolak-balik (AC)** mengirimkan energi listrik dengan tegangan dan arus bolak-

balik. Saluran transmisi AC lebih banyak digunakan karena lebih ekonomis. Hal ini karena saluran transmisi dapat langsung dihubungkan dengan output trafo penaik tegangan di pembangkit. Ketika sampai di gardu induk, untuk menurunkan tegangan dapat langsung dihubungkan dengan trafo gardu induk. Kelemahan saluran transmisi AC adalah adanya efek induktansi dan kapasitansi yang akan menambah nilai drop tegangan.

**Saluran transmisi arus searah (DC)** mengirimkan energi listrik dengan tegangan dan arus searah. Saluran transmisi arus searah peralatannya lebih rumit. Pada output trafo penaik tegangan di pembangkit diperlukan penyearah, yaitu peralatan untuk merubah listrik AC menjadi DC. Kemudian di gardu induk juga diperlukan inverter, yaitu peralatan untuk mengubah listrik DC menjadi AC agar dapat bekerja pada trafo penurun tegangan. Kedua peralatan ini yang menjadikan saluran transmisi DC lebih rumit dan biaya pembangunannya lebih mahal. Sekalipun demikian transmisi DC bisa ekonomis jika daya yang dikirim lebih besar lagi dan jarak kirimnya lebih jauh lagi, karena rugi daya dan drop tegangannya relatif lebih kecil.

## **B. Peralatan utama saluran transmisi**

Sesuai dengan fungsinya untuk menyalurkan daya atau mengalirkan arus listrik, maka komponen utama saluran transmisi adalah kawat konduktor atau penghantar fase, sedang peralatan lainnya sebagai penunjang. Saluran transmisi dengan penghantar telanjang di udara terbuka, perlu dilindungi dari bahaya akibat gangguan petir. Untuk itu di atas kawat konduktor fase dipasang kawat konduktor yang sering disebut kawat pentanahan (*ground wire*). Penghantar ini dihubungkan dengan tanah atau bumi melalui tower saluran transmisi.

Bila ada petir, diharapkan lebih dahulu mengenai kawat pentanahan, selanjutnya tegangan lebih yang terjadi dapat dinetralisir karena langsung berhubungan dengan tanah. Dengan demikian kawat konduktor utama dapat aman dari gangguan tegangan lebih akibat petir yang dapat mengganggu sistem atau merusak peralatan isolasinya. Ketinggian tower perlu diperhatikan agar medan elektro magnetik yang timbul di sekitar saluran transmisi tidak membahayakan lingkungan.

Peralatan lain pada saluran udara adalah isolator. Isolator berfungsi untuk memisahkan secara listrik

antara kawat penghantar fase dengan tower. Isolator ini juga sering disebut isolator gantung karena juga berfungsi untuk menggantung kawat penghantar pada tower. Konstruksi dan kekuatan tower perlu dipertimbangkan agar dapat aman dari gangguan angin kencang. Ketinggian tower juga diperhitungkan agar memenuhi jarak aman antar kawat fase dan antara kawat fase dengan tanah.

### **C. Penghantar Saluran Transmisi**

Bahan penghantar yang biasa digunakan pada saluran udara adalah aluminium. Salah satu hal menjadi pertimbangan penggunaan bahan aluminium sebagai penghantar pada saluran udara adalah harganya lebih murah, lebih tahan terhadap korosi dan bobotnya relatif ringan. Untuk ukuran penghantar yang sama, nilai resistansi kawat aluminium lebih besar daripada penghantar tembaga. Pada saluran transmisi dengan kawat udara, penggunaan penghantar aluminium masih lebih menguntungkan daripada tembaga. Sekalipun rugi-rugi daya saluran dengan penghantar aluminium lebih besar, tetapi biaya pembangunannya lebih murah.

Kawat penghantar pejal harganya dapat lebih murah karena untuk semua ukuran kawat hanya terdiri dari sebuah kawat saja, sehingga pembuatannya lebih sederhana. Untuk kawat yang berdiameter besar, kawat jenis ini bersifat kaku, tidak mudah untuk dibengkokkan, sehingga menjadi kurang fleksibel sehingga penanganannya lebih sulit.



Gambar 3.7. Macam-macam kabel saluran transmisi

Untuk mendapatkan kawat yang lebih fleksibel dibuatlah kawat berlilit atau stranded, yaitu untuk diameter tertentu, kawat disusun dari beberapa kawat yang mempunyai diameter yang lebih kecil dililit memanjang menjadi satu. Untuk menambah kuat tariknya, di bagian tengah kawat aluminium dipasang kawat baja memanjang.

Dengan demikian didapatkan kawat penghantar yang fleksibel dan punya kuat tarik yang lebih tinggi.

Untuk saluran transmisi kapasitas daya kecil atau jarak yang relatif pendek biasanya cukup menggunakan kawat tunggal pada tiap fasanya, karena lebih sederhana dan tentunya biayanya menjadi lebih murah. Pada saluran transmisi daya kecil, efek induktansi relatif kecil, sehingga tidak banyak berpengaruh.

Sedangkan untuk saluran transmisi yang berkapasitas besar dan jarak yang panjang, efek induktansi menjadi cukup besar, sehingga perlu diupayakan untuk mengurangi induktansi dan kapasitansi dengan menggunakan kawat berkas pada tiap fasanya. Pada kawat berkas, untuk setiap fasanya memerlukan beberapa penghantar, bisa dua, tiga atau empat kawat yang dipasang berjajar dengan jarak tertentu, dan diberi pemisah (*spacer*) pada setiap panjang saluran tertentu. Dengan demikian masing-masing penghantar tidak saling bersentuhan dan jarak antar kawatnya tetap.

Pemasangan kawat berkas lebih rumit dibanding dengan kawat tunggal, akan tetapi hal ini dilakukan karena disamping untuk mengurangi efek induktansi juga dapat

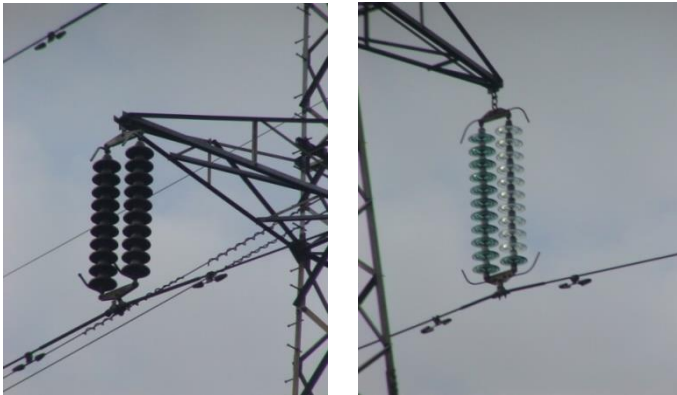
mengurangi efek korona, yaitu gejala kerusakan lapisan dielektrik di sekitar penghantar akibat adanya medan elektro magnet. Efek ini akan lebih besar jika keadaan udara di sekitar saluran lembab akibat hujan deras.

#### **D. Isolator**

Isolator saluran transmisi umumnya dibuat dari bahan porselin yang mempunyai kekuatan isolasi yang tinggi dan juga mempunyai kekuatan mekanis cukup tinggi. Hal ini karena fungsi isolator pada saluran transmisi jenis saluran udara adalah untuk mengisolasi tegangan antara kawat penghantar dengan tower penopang, sehingga semakin tinggi tegangan saluran diperlukan isolator yang semakin panjang. Selain itu fungsi isolator juga untuk menggantungkan kawat penghantar pada tower penopang.

Isolator gantung untuk saluran transmisi kadang berbentuk batang memanjang, atau kadang terdiri dari beberapa isolator pendek yang berbentuk seperti mangkok terbalik yang dirangkai memanjang. Jenis yang kedua lebih fleksibel, panjangnya disesuaikan dengan kekuatan isolasi yang diinginkan.





Gambar 3.8 Isolator gantung untuk saluran transmisi

Ada dua watak yang perlu diperhatikan pada isolator saluran transmisi:

**Tegangan lompatan api** yaitu tegangan minimal yang dapat menyebabkan lompatan bunga api antara kawat penghantar dan besi tower, terutama ketika bagian luar isolator dalam keadaan basah atau kotor. Tegangan lompatan api suatu isolator bisa menurun bila isolator terkena kotoran misalnya debu atau sejenisnya, sehingga perlu dilakukan pembersihan isolator secara rutin, untuk menjaga agar isolator tetap aman dari lompatan api.

**Tegangan tembus** yaitu tegangan batas minimal tegangan yang dapat menyebabkan arus bocor tertentu yang

menembus bagian dalam bahan isolator. Tegangan tembus biasanya dipengaruhi oleh kualitas bahan isolator dan juga umur pakainya. Semakin lama pemakaian, kualitas bahan isolator akan menurun sehingga dapat menurunkan nilai tegangan tembusnya.

### **E. Watak Tegangan Saluran Transmisi**

Watak saluran transmisi yang perlu diperhatikan adalah adanya perubahan tegangan yang terjadi pada saluran yang disebut watak tegangan. Tegangan pada ujung penerimaan selalu lebih rendah dari tegangan pada ujung pengiriman, karena adanya turun tegangan atau drop tegangan pada saluran. Turun tegangan adalah selisih antara tegangan di ujung pengiriman dengan tegangan di ujung penerima. Nilai turun tegangan pada saluran transmisi dihitung berdasarkan rumus:

$$V_{\text{drop}} = I \times Z.$$

dimana  $V_{\text{drop}}$ : turun tegangan pada saluran

$I$  : arus yang mengalir pada saluran

$Z$  : impedansi saluran

Jadi nilai turun tegangan dipengaruhi oleh besarnya impedansi saluran dan arus yang mengalir pada saluran. Semakin besar daya yang disalurkan berarti semakin besar arus yang mengalir, maka semakin besar pula nilai turun tegangannya. Impedansi saluran ( $Z$ ) dipengaruhi resistansi penghantar ( $R$ ), reaktansi induktif ( $X_L$ ) dan reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) saluran, dapat dihitung dengan rumus:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Jatuh tegangan sering dinyatakan sebagai nilai prosen setelah dibandingkan dengan tegangan kerja di ujung penerima.

$$\text{Jatuh tegangan relatif} = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100 \%$$

dimana  $V_s$  : tegangan pada ujung pengiriman

dan  $V_r$  : tegangan pada ujung penerimaan

## F. Efisiensi Saluran Transmisi

Daya yang diterima beban setelah melewati saluran transmisi selalu lebih kecil dibanding daya yang dikirim, karena ada daya yang hilang pada saluran (*losses*). Perbandingan antara daya yang diterima di ujung penerima dengan daya yang dikirim di ujung pengiriman disebut daya guna atau efisiensi, yang biasanya dinyatakan dalam bentuk persen.

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_r}{P_s} \times 100 \%$$

$$\text{Atau } \eta = \frac{P_r}{P_r + P_h} \times 100 \%$$

Dimana  $P_s$  : daya yang dikirim sumber

$P_r$  : daya yang diterima beban

$P_h$  : daya yang hilang pada saluran (*losses*)

Jumlah daya yang hilang ( $P_h$ ) pada saluran terutama dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir ( $I$ ) pada saluran dan besarnya resistansi saluran ( $R$ ), sesuai dengan rumus :  $P_h = I^2 \times R$ . Efisiensi pada saluran transmisi nilainya selalu lebih kecil dari 100 % yang berarti daya yang dikirimkan tidak seluruhnya bisa diterima oleh beban karena pasti ada daya yang hilang pada saluran.

**SOAL LATIHAN**

1. Pada sistem interkoneksi jaringan listrik di Jawa, sebagian besar menggunakan saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET). Mengapa demikian?
2. Sedangkan pada jaringan antar kota cukup menggunakan tegangan tinggi 150 kV. Apa pertimbangan teknisnya?
3. Saluran transmisi kebanyakan menggunakan tegangan bolak-balik. Keuntungan apa saja yang didapatkan dibanding bila menggunakan tegangan searah.
4. Berikan penjelasan tentang dua watak saluran transmisi yang sangat perlu dipertimbangkan dalam pengoperasiannya.
5. Langkah apa yang dilakukan untuk mengurangi drop tegangan yang terjadi pada saluran transmisi.
6. Pada musim hujan malam hari kadang kita lihat saluran transmisi menyala, jelaskan proses terjadinya gejala ini dan apa akibatnya bila terlalu sering terjadi.
7. Ketinggian kawat penghantar saluran transmisi tidak boleh kurang dari standar yang telah ditentukan. Mengapa demikian?



## **BAB IV**

### **GARDU INDUK DAN TRANSFORMATOR**

Gardu induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa sejumlah peralatan pemutus/penghubung aliran arus dan trafo penurun tegangan yang dipasang di antara dua komponen sistem tenaga listrik lainnya. Fungsi utama gardu induk adalah untuk memutus/menghubungkan aliran daya arus listrik dan menyesuaikan level tegangan sistem yang dihubungkan. Fungsi lain gardu induk adalah untuk mengatur aliran daya listrik pada saluran transmisi dan tempat peralatan-peralatan pengaman sistem tenaga listrik.

#### **A. Klasifikasi Gardu Induk**

Gardu induk pada sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan berdasar tegangan operasinya, yaitu gardu induk tegangan tinggi dan gardu induk tegangan ekstra tinggi.

**Gardu induk tegangan tinggi** yaitu gardu induk yang berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi dari

saluran transmisi ke tegangan tegangan menengah untuk memasok energi listrik ke jaringan distribusi.

**Gardu induk tegangan ekstra tinggi** yaitu gardu induk yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan tinggi untuk memasok saluran transmisi tegangan tinggi.

Selain berdasar tegangan kerjanya, gardu induk juga sering dikelompokkan berdasar peletakan peralatan-peralatan utamanya. Dalam hal ini ada empat tipe gardu induk:

**Gardu induk tipe pasangan luar** adalah gardu induk yang peralatan tegangan tingginya, seperti transformator dan peralatan pemutus/penghubung (*switch gear*) dipasang di luar ruangan. Sedangkan yang diletakkan di dalam gedung/ruangan hanyalah peralatan yang rawan terhadap gangguan hujan, seperti peralatan kontrol dan peralatan pengukuran. Jenis gardu ini memerlukan tanah yang luas, akan tetapi biaya konstruksinya lebih murah dan pendinginannya lebih mudah. Oleh karena itu gardu induk jenis ini paling banyak digunakan dan biasanya dibangun dipinggiran kota.





Gambar 4.1 Gardu induk tipe pemasangan luar

**Gardu Induk jenis pasang dalam** adalah gardu induk yang hampir semua komponennya dipasang didalam gedung/ruangan. Pembangunan gardu induk tipe ini memerlukan biaya yang relatif lebih mahal, karena diperlukan bangunan gedung yang dapat memuat semua peralatan gardu induk. Gardu induk tipe ini membutuhkan lahan yang tidak begitu luas, sehingga cocok dibangun dipusat kota yang mana harga lahan cukup mahal. Dengan diletakkannya semua peralatan di dalam bangunan gedung, maka gardu induk tipe ini punya kelebihan lebih aman dari gangguan cuaca.



Gambar 4.2 Gardu induk tipe pasangan dalam

**Gardu induk tipesetengah pasangan luar** yaitu gardu induk yang sebagian dari peralatan tegangan tingginya yaitu peralatan pemutus/penghubung dipasang didalam gedung. Sedangkan trafo dayanya dipasang di luar ruangan, sehingga ruangan yang diperlukan tidak begitu luas. Gardu induk tipe ini kadang juga dikatakan sebagai gardu induk tipe setengah pasangan dalam. Kelebihan dan kekurangan gardu induk tipe ini adalah tengah-tengah antara kedua tipe di atas.



Gambar 4.3 Gardu induk tipe pasangan setengah luar

**Gardu induk jenis bawah tanah**, hampir semua peralatan terpasang dalam bangunan bawah tanah, biasanya alat pendinginnya terletak diatas tanah. Gardu induk jenis inibanyak dibangun dipusat kotakarena tidak mengganggu pemandangan.

**Gardu induk jenis mobil** yaitu gardu induk yang semua peralatannya diletakkan di atas kendaraan atau trailer, sehingga lebih mudah untuk dipindahkan ke lokasi yang memerlukan. Kapasitas gardu induk ini biasanya relatif kecil, dan hanya digunakan untuk mengatasi beban lebih sementara, atau untuk pengganti sementara gardu induk yang rusak.Maka dapat dikatakan bahwa gardu ini tidak

dijadikan sebagai gardu utama, melainkan sebagai gardu induk cadangan yang dapat dipindah-pindah.

Berdasar isolasi busbaranya, gardu induk dikelompokkan menjadi dua, yaitu gardu induk konvensional dan gardu induk isolasi gas.

**Gardu induk konvensional** adalah gardu induk yang peralatannya berisolasi udara bebas karena sebagian besar peralatannya dipasang terbuka di luar gedung. Tipe gardu induk ini banyak digunakan karena biaya pembangunannya lebih murah, hanya saja memerlukan lahan yang relatif luas.

**Gardu induk dengan isolasi gas atau *gas insulated switchgear (GIS)*** adalah suatu gardu induk yang semua peralatan *switch-gear*nya berisolasi gas SF<sub>6</sub>, karena sebagian besar peralatannya dimasukkan dalam tabung dan terpasang di dalam gedung. Gardu induk tipe ini digunakan untuk mengatasi kesulitan lahan jika harus membangun gardu induk konvensional, biasanya dibangun di tengah perkotaan.



Gambar 4.4 Gardu induk dengan isolasi gas

## B. Peralatan utama Gardu Induk

Sesuai dengan fungsi gardu induk yaitu untuk menurunkan tegangan, maka komponen utamanya adalah **transformator** atau **trafo daya**. Pada gardu induk tegangan ekstra tinggi atau GITET, trafo digunakan untuk menurunkan dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi. Trafo daya ini menghubungkan dua bus yaitu bus tegangan ekstra tinggi dan bus tegangan tinggi, sehingga sering disebut *inter bus transformer* (IBT). Trafo ini biasanya berkapasitas besar dan disusun dari tiga buah trafo satu fase

yang dirangkai menjadi sistem trafo tiga fase, untuk kepentingan kemudahan transportasi dan pemasangan.

Sedangkan pada gardu induk tegangan tinggi, trafo daya berfungsi menurunkan tegangan tinggi dari saluran transmisi ke tegangan menengah untuk memasok daya di jaringan distribusi. Kapasitas trafonya relatif kecil, sehingga digunakan satu atau beberapa trafo tiga fase.

**Peralatan penghubung dan pemutus tenaga** atau *Circuit Breaker* (PMT/CB) digunakan untuk memutus rangkaian baik dalam keadaan normal maupun ketika gangguan. Nilai arus gangguan jauh lebih besar daripada arus pada saat beban normal, bahkan bisa sampai beberapa kalinya. Kapasitas peralatan penghubung dan pemutus tenaga harus mampu beroperasi pada saat terjadi gangguan, baik gangguan arus lebih, tegangan lebih maupun hubung singkat. Kontak hubung pada PMT ditempatkan dalam tabung atau ruang tertutup, sehingga keadaan kontakannya tidak nampak, apakah kondisi membuka atau menutup. Pada saat memutus arus beban atau arus gangguan, pada kontak CB akan timbul bunga api akibat nilai arus yang cukup besar. Untuk menghindari panas berlebihan yang timbul, diperlukan pemadam busur api. Pemadam busur api pada

CB atau PMT ada yang menggunakan minyak, semburan gas, medan magnet atau yang lainnya.



Gambar 4.5 Pemutus tenaga tegangan tinggi dengan SF6

Pemutus tenaga di gardu induk dirancang agar dapat bekerja secara otomatis ketika terjadi gangguan pada sistem dengan bantuan rele proteksi. Sedangkan untuk memutus atau menghubungkan rangkaian saat beban normal, PMT dioperasikan manual.

**Saklar Pemisah** atau *Disconnecting Switch* (PMS/DS) yang biasa dipasang seri dengan pemutus tenaga digunakan untuk memisahkan rangkaian peralatan gardu induk dari sistem saluran transmisi maupun sistem distribusi.

Perbedaannya dengan pemutus tenaga adalah kontak pemisah diletakkan di tempat terbuka, sehingga nampak jelas posisi kontaknya terputus atau terhubung, sedangkan pada PMT, kontak diletakkan pada tabung tertutup. PMS tidak dirancang untuk memutus arus beban, apalagi arus gangguan. PMS hanya digunakan untuk memisahkan rangkaian secara fisik, sehingga PMS hanya dioperasikan pada saat rangkaian tidak berbeban. Dengan kata lain PMS hanya dioperasikan pada saat PMT pada posisi terbuka atau OFF, sehingga ketika dioperasikan tidak terjadi loncatan bunga api yang besar.



Gambar 4.6 Saklar pemisah tegangan ekstra tinggi



Pemadaman busur api yang terjadi cukup dengan sirkulasi udara bebas di sekitarnya. Pembukaan atau penutupan PMS dilakukan secara manual, sekalipun dioperasikan dari ruang kontrol.

Beberapa peralatan lainnya yang diperlukan untuk menunjang fungsi gardu induk antara lain: *lightning arrester*, trafo arus, trafo tegangan, trafo pemakaian sendiri, *grounding*, resistor *grounding*, busbar, ruang kontrol panel kontrol, panel proteksi, alat ukur dan baterai.

***Lightning Arrester*** (LA) merupakan peralatan perlindungan atau proteksi peralatan gardu induk dari bahaya akibat tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir atau surja hubung. LA dipasang di dekat peralatan yang akan dilindungi, seperti titik masuk saluran transmisi ke gardu induk, di dekat peralatan pemutus tenaga dan di dekat trafo daya.

LA merupakan peralatan perlindungan yang mempunyai nilai resistansinya dapat berubah-ubah. Salah satu ujung arester dihubungkan dengan kawat penghantar fase, sedang ujung yang lain dihubungkan dengan tanah atau ground.



Gambar 4.7 Lightning Arester untuk melindungi trafo daya

Dalam keadaan normal, yaitu saat tidak terjadi gangguan petir atau surja hubung, LA bersifat isolatif, sehingga tidak ada arus yang mengalir dari kawat jaringan ke tanah lewat LA. Ketikapada jaringan terjadi gangguan tegangan lebih sesaat yang menyebabkan LA bekerja, maka LA berubah sifat menjadi konduktif, sehingga dapat menyalurkan arus listrik akibat tegangan lebih itu ke bumi. Dengan demikian peralatan lain yang terhubung dengan

jaringan tersebut aman. Setelah petir atau surja hubung berhenti, maka LA akan kembali bersifat isolatif, sehingga sistem kembali bekerja normal.

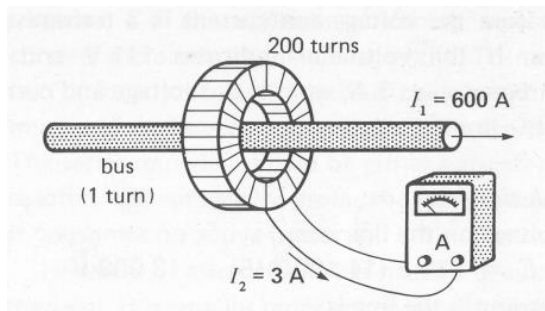
**Grounding** atau pentanahan adalah konduktor yang ditanam di dalam tanah yang berfungsi untuk mengalirkan arus ke tanah atau ke bumi. Nilai resistansi antara terminal grounding dan tanah disebut resistansi grounding. Nilai resistansi grounding ini disesuaikan dengan kebutuhan, misalnya untuk pemasangan LA, nilai resistansi grounding dibuat sekecil mungkin.



Gambar 4. 8 Terminal grounding di gardu induk

Sedangkan untuk pentanahan titik netral trafo, nilai resistansi grounding perlu diperhitungkan agar arus yang lewat tidak terlalu besar. Untuk keperluan pengaturan resistansi grounding ini dipasang peralatan yang disebut *neutral grounding resistance* (NGR).

**Trafo arus dan trafo tegangan** adalah perlengkapan gardu induk yang masing-masing digunakan untuk memperkecil besaran arus dan tegangan yang ada pada jaringan listrik di gardu induk agar dapat dioperasikan pada peralatan pengukuran dan peralatan proteksi. Untuk mengukur kuat arus yang besar digunakan trafo arus yang mempunyai perbandingan arus primer dan sekunder atau rasio tertentu.

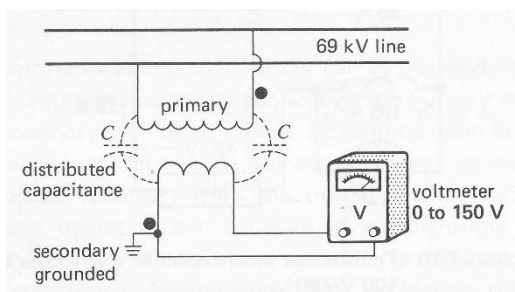


Gambar 4.9 Pemasangan trafo arus pada jaringan

Dengan demikian besar arus yang masuk ke amperemeter sebanding dengan nilai arus pada jaringan.

Kumparan primer trafo arus dipasang seri dengan jaringan, sedangkan kumparan sekundernya dipasang pada ampermeter. Kumparan primer arus ada yang terdiri dari beberapa lilitan, ada juga yang terdiri dari satu penghantar saja. Skema pemasangan trafo arus pada jaringan dapat dilihat pada gambar 4.9.

Trafo tegangan mempunyai prinsip kerja mirip dengan trafo daya penurun tegangan, hanya saja trafo ini kapasitas dayanya relatif kecil, karena yang dipentingkan adalah memiliki perbandingan tegangan tertentu antara kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer dipasang pada dua titik yang akan diukur tegangannya, sedang kumparan sekundernya dihubungkan dengan voltmeter. Seperti halnya trafo arus, nilai tegangan yang terukur di bagian sekunder sebanding dengan tegangan primernya.



Gambar 4.10 Pemasangan trafo arus pada jaringan

Skema pemasangan trafo arus pada jaringan dapat dilihat pada gambar 4.10.

**Trafo pemakaian sendiri** yang dimaksud dalam bahasan ini adalah trafo daya yang kapasitasnya relatif kecil yang dipasang di gardu induk yang digunakan untuk mensuplai daya bagi kepentingan gardu induk tersebut. Dengan demikian kebutuhan listrik untuk gardu induk tidak diambilkan dari jaringan distribusi yang keluar ke arah beban. Kebutuhan daya listrik untuk gardu induk meliputi penerangan, sumber daya untuk motor-motor penggerak CB, pengisi daya baterai, pendingin ruangan, penerangan serta sumber untuk peralatan pengukuran dan proteksi.

**Busbar atau ril** pada gardu induk adalah peralatan gardu induk yang berupa bentangan penghantar yang digunakan sebagai terminal penyambungan saluran transmisi yang masuk atau keluar gardu induk. Penyambungan trafo daya ke saluran transmisi juga dilakukan melalui busbar ini. Pada gardu induk ada dua macam busbar, yaitu busbar yang berhubungan dengan primer trafo dan busbar yang berhubungan dengan sekunder trafo.



Gambar 4.11 Burbar gardu induk 150 kV

**Baterai** merupakan sumber daya arus searah yang terdiri dari beberapa aki yang dirangkai seri dan paralel yang berfungsi untuk mensuplai daya DC untuk peralatan pengukuran, peralatan kendali dan proteksi pada keadaan suplai daya utama padam. Pada saat gardu induk beroperasi normal, peralatan pengukuran, peralatan kendali dan proteksi diperasikan dengan sumber daya DC yang berasal dari jaringan listrik AC yang disearahkan. Baterai gardu induk selalu dihubungkan dengan pengisi daya agar baterai selalu siap digunakan ketika sumber listrik utama padam.

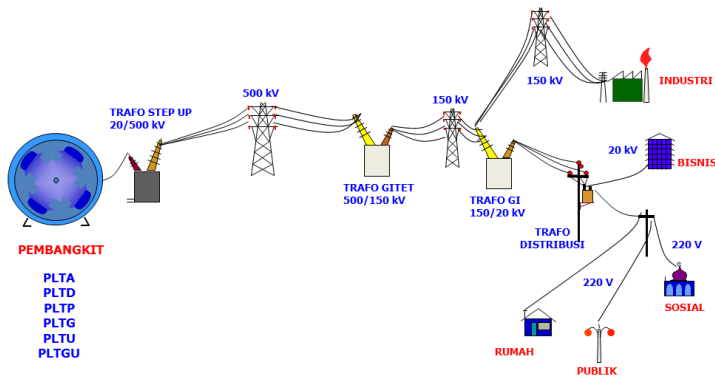
Perlengkapan lain yang juga penting adalah **ruang kontrol, panel kontrol, alat ukur dan panel proteksi**. Untuk mengendalikan operasi sebuah gardu induk, peran ruang kontrol lengkap dengan panel kontrol sangat penting. Dari ruang kontrol inilah pengoperasian peralatan-peralatan gardu induk yang ada di luar ruang dilakukan, seperti membuka atau menutup PMT, mengoperasikan PMS, menaikkan atau menurunkan tap tarfo dan lain-lain. Dalam ruang kontrol ini juga terdapat panel proteksi yang digunakan untuk men-setting dan memonitor kerja peralatan proteksi. Peralatan pengukuran arus, tegangan, frekuensi, energi, faktor daya dan lain-lain semuanya juga ditempatkan dalam ruang ini.

## **B. Transformator**

Sesuai dengan fungsi transformator atau trafo yaitu untuk menaikkan atau menurunkan tegangan, maka trafo pada sistem tenaga listrik dipasang di antara dua sistem yang mempunyai level tegangan yang berbeda. Sebagai contoh adalah pada kedua ujung saluran transmisi. Pada ujung pengiriman atau sisi pembangkit dipasang trafo penaik tegangan, sedang pada sisi penerima di gardu induk



dipasang trafo penurun tegangan. Trafo utama yang digunakan di gardu induk disebut trafo daya. Dengan melalui trafo daya ini tegangan diturunkan atau dinaikkan, tetapi daya relatif tetap. Penempatan trafo daya pada sistem tenaga listrik dapat dilihat pada skema gambar 4.12.

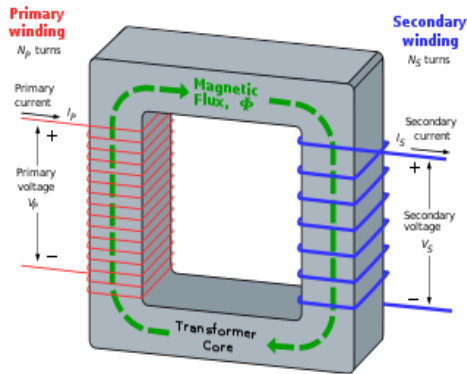


Gambar 4.12 Penempatan trafo daya pada sistem tenaga listrik

## 1. Prinsip kerja trafo

Pada prinsipnya trafo tersusun dari dua buah lilitan yang dipasang pada sebuah inti besi. Salah satu kumparan dihubungkan dengan tegangan masukan, kemudian disebut lilitan primer, sedang lilitan yang lain dihubungkan dengan beban disebut lilitan sekunder. Untuk memudahkan

memahami prinsip kerja trafo ini, trafo digambarkan sebagaimana tampak pada gambar 4.13.



Gambar 4.13 Bagian-bagian utama trafo

Kumparan primer digambarkan di sebelah kiri yang dihubungkan dengan sumber tegangan, sedangkan kumparan sekunder digambarkan di sebelah kanan yang dihubungkan dengan beban. Trafo bekerja menaikkan atau menurunkan tegangan berdasar pada prinsip gejala elektro magnetik dan induksi elektro magnetik. Gejala elektro magnetik terjadi pada kumparan primer, sedangkan gejala induksi elektro magnetik terjadi pada kumparan sekunder.

Secara sederhana prinsip kerja trafo dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka pada kumparan tersebut

akan mengalir arus listrik bolak-balik yang mengakibatkan di sekitar kumparan timbul medan magnet atau fluks magnet yang arah dan besarnya berubah-ubah. Perubahan arus listrik menjadi medan magnet ini disebut gejala elektro magnetik.

2. Flux magnet yang terjadi pada kumparan primer akan mengalir melalui inti besi sehingga sampai ke kumparan sekunder.
3. Selanjutnya pada kumparan sekunder, konduktor akan terkena fluks magnet yang berubah-ubah yang berasal dari kumparan primer yang mengakibatkan terjadi tegangan induksi antara kedua ujung kumparan sekunder yang besarnya berubah-ubah juga. Perubahan medan magnet yang berubah-ubah menjadi tegangan semacam ini disebut gejala elektro magnetik. Tegangan induksi ini menyebabkan adanya beda tegangan antara kedua ujung kumparan sekunder.
4. Bila kumparan sekunder dirangkai dengan beban, maka pada rangkaian sekunder akan mengalir arus listrik bolak-balik ke beban sesuai dengan arus yang mengalir pada kumparan primer.

Kuat medan magnet yang timbul pada kumparan primer sebanding dengan arus yang mengalir pada kumparan itu. Selain itu juga dipengaruhi oleh jumlah lilitannya. Semakin banyak jumlah lilitan, maka kuat medan magnet yang timbul semakin besar, dan sebaliknya. Pada kumparan sekunder, tegangan induksi yang dibangkitkan dipengaruhi oleh besar kuat medannya. Selain itu juga dipengaruhi oleh jumlah lilitannya. Semakin banyak jumlah lilitan, maka beda tegangan akan semakin tinggi, dan sebaliknya. Dengan demikian perbandingan antara tegangan pada kumparan sekunder dengan tegangan pada kumparan primer sesuai dengan perbandingan jumlah lilitan sekunder dengan jumlah lilitan primer.

## **2. Watak trafo daya pada sistem tenaga listrik**

Watak yang penting dalam trafo daya adalah regulasi dan efisiensi. Regulasi tegangan trafo berkaitan dengan perbedaan antara tegangan sekunder trafo pada saat berbeban penuh dengan tegangan saat tanpa beban. Efisiensi trafo berkaitan dengan perbandingan antara daya output trafo dengan daya inputnya.

Secara teoritis untuk mempermudah pembahasan, bisa digambarkan sebuah trafo ideal, artinya trafo daya yang

bekerja tanpa menimbulkan rugi daya dan turun tegangan. Trafo ideal dianggap bekerja tanpa rugi daya, artinya daya output trafo sama dengan daya inputnya. Tanpa turun tegangan artinya tegangan pada kumparan primer tidak berkurang karena adanya tambahan beban. Pada trafo daya ideal ini berlaku:

1. Daya output ( $P_{out}$ ) sama dengan daya inputnya ( $P_{in}$ ) atau ( $P_{out} = P_{in}$ )
2. Perbandingan antara tegangan sekunder ( $V_s$ ) dengan tegangan primer ( $V_p$ ) sama dengan perbandingan antara jumlah lilitan primer ( $N_p$ ) dengan jumlah lilitan sekunder ( $N_s$ ) atau

$$V_s : V_p = N_s : N_p$$

3. Perbandingan antara arus sekunder ( $I_s$ ) dengan arus primer ( $I_p$ ) sama dengan perbandingan antara tegangan primer ( $V_p$ ) dengan tegangan sekunder ( $V_s$ )

$$I_s : I_p = V_p : V_s \text{ atau } V_p \times I_p = V_s \times I_s$$

$$\text{karena } P_{in} = P_{out}$$

Dalam praktek trafo yang beroperasi ideal semacam ini tidak ada. Hal ini karena bila sebuah penghantar dialiri

arus listrik, maka pada penghantar tersebut akan terjadi turun tegangan ( $V_{\text{drop}}$ ) sebesar hasil kali nilai impedansi ( $Z$ ) dan arusnya ( $I$ ) atau ( $V_{\text{drop}} = I \times Z$ ). Impedansi trafo merupakan gabungan antara nilai resistansi kawat tembaga ( $R$ ) dan nilai reaktansi lilitan ( $X$ ) atau  $Z = R + jX$ . Impedansi lilitan ini ada pada lilitan primer maupun sekunder. Inilah yang menyebabkan adanya regulasi tegangan.

Selain terjadi drop tegangan, pada masing-masing lilitan primer dan sekunder juga akan terjadi rugi daya ( $P_{\text{rugi-rugi}}$ ) atau *losses* sebesar hasil kali antara nilai hambatan ( $R$ ) dan kuadrat arusnya ( $I$ ) yang sering disebut rugi tembaga. ( $P_{\text{rugi-rugi}} = I^2 \times R$ ). Inilah yang menyebabkan adanya efisiensi trafo.

Pada saat trafo belum dibebani, belum ada arus yang mengalir pada lilitan sekunder, maka drop tegangan hanya terjadi pada lilitan primer, itupun nilainya relatif kecil karena arus yang mengalir juga kecil. Namun pada saat dibebani penuh, drop tegangan terjadi pada kedua lilitan dan nilainya cukup besar karena arus yang mengalir pada masing-masing lilitan juga cukup besar. Perbedaan nilai tegangan pada lilitan sekunder, saat trafo berbeban penuh dengan saat trafo tanpa beban dibandingkan dengan

tegangan saat trafo berbeban penuh disebut regulasi tegangan. Regulasi tegangan trafo biasanya dinyatakan dalam prosen.

$$\text{Regulasi tegangan} = \frac{V_o \text{ tanpa beban} - V_o \text{ beban penuh}}{V_o \text{ beban penuh}} \times 100 \%$$

Pada saat trafo beroperasi daya output trafo nilainya selalu lebih kecil daripada daya inputnya. Hal ini karena dalam trafo terjadi rugi daya yang sebagian besarnya berubah menjadi panas, sehingga bila trafo beroperasi cukup lama, maka suhu trafo akan naik. Perbandingan antara daya output trafo dengan daya inputnya disebut daya guna atau efisiensi. Efisiensi biasanya juga dinyatakan dengan prosen. Semakin tinggi efisiensi sebuah trafo, maka dikatakan kualitas trafo tersebut semakin baik.

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{daya output trafo}}{\text{daya input trafo}} \times 100 \%$$

Rugi-rugi trafo terdiri dari rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti besi. Besarnya rugi-rugi inti besi dipengaruhi oleh tinggi rendahnya tegangan trafo sehingga dalam operasinya nilai rugi-rugi intinya relatif tetap. Sedangkan rugi-rugi

tembaga dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada trafo, sehingga makin besar beban trafo, maka nilai rugi-rugi tembaganya semakin besar. Selain itu medan magnet yang timbul pada kumparan primer tidak seluruhnya dapat mengalir ke kumparan sekunder yang berarti ada medan magnet yang bocor/hilang. Hal ini juga menambah rugi daya trafo.

### **SOAL LATIHAN**

1. Gardu induk merupakan komponen pokok dalam suatu sistem tenaga listrik. Jelaskan pengertian dan fungsinya.
2. Sebutkan perbedaan yang penting antara gardu induk di unit pembangkit dengan gardu induk di ujung penerima saluran transmisi.
3. Untuk memilih tipe gardu induk yang cocok untuk suatu wilayah, faktor apa saja yang perlu dipertimbangkan.
4. Jelaskan prinsip kerja trafo daya, lalu bandingkan dengan prinsip kerja generator pembangkit.
5. Kadang kita jumpai trafo distribusi tiba-tiba berhenti beroperasi atau bahkan ada yang terbakar, sebutkan



hal-hal yang dapat menyebabkan terjadinya hal tersebut.

6. Pada gardu induk maupun trafo daya biasanya dipasang arester. Jelaskan fungsinya.



# **BAB V**

## **JARINGAN DISTRIBUSI**

### **A. Pengertian dan Macamnya**

Jaringan distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa jaringan penghantar yang menghubungkan antara gardu induk pusat beban dan pelanggan. Ruang lingkup jaringan distribusi meliputi seluruh komponen mulai penyulang atau *feeder* di dekat terminal sekunder trafo gardu induk hingga alat pembatas dan pengukur (APP) di pelanggan. Fungsi jaringan distribusi adalah mendistribusikan energi listrik ke pelanggan sesuai daya dan tegangan yang dibutuhkan. Jaringan distribusi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, sehingga kualitas jaringan distribusi langsung berpengaruh pada kenyamanan pelanggan. Salah satu contoh jaringan distribusi dapat dilihat pada gambar 5.1.



Gambar 5.1 Jaringan dsitribusi tenaga listrik

### **1. Tegangan jaringan dsitribusi.**

Jaringan distribusi tenaga listrik terbagi dalam dua level tegangan, yaitu jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) atau sering disebut jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi tegangan rendah (JTR) atau sering disebut jaringan distribusi sekunder.

JTM sebagian besar menggunakan jaringan 3 fase 4 kawat, yaitu 3 kawat fase dan 1 kawat netral dengan

tegangan antar fasenya 20 kV, sedang sebagian lainnya jaringan 1 fase 2 kawat dengan tegangan 11,5 kV. JTR sebagian menggunakan jaringan 3 fase 4 kawat mirip JTM untuk melayani pelanggan 3 fase dengan tegangan antar fasenya 380 volt, sedang sebagian lainnya menggunakan jaringan 1 fase 3 kawat dengan tegangan 220 volt. Antara jaringan JTR dan JTM dipasang trafo distribusi sesuai dengan kebutuhan, ada yang menggunakan trafo 3 fase, ada yang menggunakan trafo 1 fase. JTM digunakan untuk menghubungkan antara gardu induk dengan trafo distribusi atau dengan pelanggan tegangan menengah. Sedangkan JTR digunakan untuk menghubungkan antara trafo distribusi dengan pelanggan tegangan rendah. Bila jaringan tegangan rendah dan jaringan tegangan menengah menggunakan tiang yang sama maka kawat netral yang digunakan cukup satu saja, sebagai kawat netral bersama kedua sistem tersebut.

Untuk pelanggan yang menggunakan daya cukup besar, misalnya industri, rumah sakit atau kampus biasanya berlangganan 3 fase dengan tegangan menengah 20 kV. Untuk kepentingan menurunkan tegangan dan pendistribusiannya, pihak pelanggan mengelola gardu

distribusi sendiri. Sedangkan pelanggan dengan daya beban yang relatif kecil menggunakan tegangan rendah dan dilayani dengan jaringan distribusi tegangan rendah yang dihubungkan dengan trafo distribusi.

## **2. Macam jaringan distribusi**

Berdasar peletakan kawat penghantarnya, jaringan distribusi tenaga listrik terbagi dua macam, yaitu jaringan kabel udara dan jaringan kabel tanah. Sebagian besarnya menggunakan kabel udara dengan kawat telanjang yang dipasang pada tiang dengan isolator. Jaringan distribusi jenis ini dari sisi biaya pembangunannya lebih murah, penyambungan jaringan lebih mudah dan perawatannya lebih sederhana. Hanya saja jenis jaringan ini dapat mengganggu pemandangan, karena banyak bentangan kawat yang melintas sepanjang jaringan. Kelemahan yang lain dari sistem ini adalah lebih rawan terhadap gangguan cuaca dan sering terganggu oleh pepohonan yang tumbuh di sekitar jaringan.

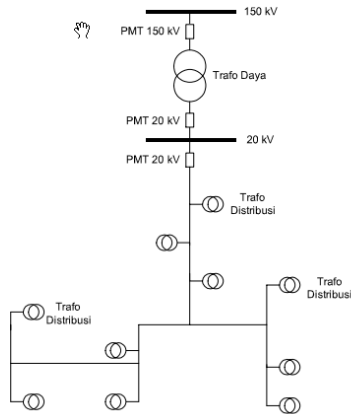
Berbeda dengan jaringan bawah tanah yang menggunakan kabel penghantar berisolasi, menjadikan biaya pembangunannya lebih mahal. Jaringan bawah tanah mempunyai kelebihan tidak mengganggu pemandangan dan

lebih aman terhadap gangguan cuaca. Hanya saja bila terjadi kerusakan, penanganannya lebih rumit. Jaringan bawah tanah biasanya digunakan pada daerah yang menuntut estetika yang tinggi dan jarak yang relatif pendek.

### **3. Topologi jaringan**

Topologi jaringan distribusi dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu: jaringan radial dan jaringan ring. Jaringan distribusi dikatakan radial jika sebuah penyulang melayani beberapa pelanggan dan trafo distribusi dan jaringannya tidak terhubung dengan penyulang yang lain, baik dari gardu induk yang sama maupun gardu induk lain. Skema jaringan distribusi radial sebagaimana tampak pada gambar 5.2.

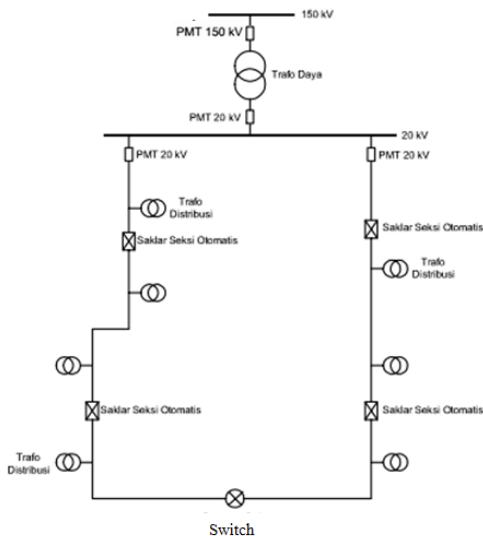
Bentuk jaringan radial merupakan bentuk jaringan distribusi yang paling sederhana. Pada sistem ini biaya pembangunannya juga relatif murah dan pengelolaannya lebih sederhana, karena jaringan hanya satu arah dan jumlah jaringannya relatif sedikit. Kelemahan sistem jaringan ini adalah apabila terjadi gangguan pada suatu gardu induk atau atau terjadi kerusakan pada penyulang atau pada jaringan utama, maka semua beban yang melalui jaringan tersebut akan terputus.



Gambar 5.2 Jaringan distribusi radial

Kelemahan yang ada pada sistem radial diselesaikan dengan menggunakan sistem ring, yaitu pada pelanggan dan trafo distribusi yang dilayani suatu penyulang dipasang jaringan distribusi yang menghubungkannya dengan pelanggan dan trafo distribusi yang dilayani penyulang yang lain. Pada jaringan penghubung ini dipasang *switch* atau pemutus-penghubung, sehingga dapat diputus atau dihubung sesuai kebutuhan. Pada keadaan normal switch ini berada pada posisi terbuka, sehingga jaringan beroperasi radial. Jaringan semacam ini disebut jaringan ring yang dioperasikan secara radial. Biaya pembangunan bentuk jaringan ring lebih mahal karena adanya tambahan jaringan penghubung yang kadang jaraknya cukup jauh.





Gambar 5.3 Jaringan distribusi ring

Penggunaan sistem ring diharapkan dapat meningkatkan kontinuitas pelayanan kepada pelanggan. Karena bila terjadi gangguan pada jaringan tertentu yang mengakibatkan pelanggan atau trafo distribusi tidak mendapat suplai daya, maka suplai daya dapat dialihkan melalui jaringan atau feeder yang lain melalui jaringan penghubung. Pemindahan suplai daya pada jaringan distribusi ini dilakukan dengan mengoperasikan beberapa switch yang dipasang pada jaringan tersebut. Pengelolaan sistem ini tentunya lebih rumit dan biaya pembangunannya

lebih mahal, tetapi tingkat kualitas pelayanan tenaga listrik ke pelanggan akan lebih baik.

#### **4. Peralatan pendukung jaringan distribusi**

Pada jaringan distribusi perlu dipasang beberapa switch yang pada kondisi normal menutup atau close, sedang pada kondisi perawatan jaringan, switch ini bisa dibuka untuk memisahkan jaringan yang diperbaiki dengan jaringan sumber. Demikian juga pada kondisi pasca gangguan switch ini dapat digunakan untuk memisahkan jaringan yang terganggu dari jaringan yang normal agar jaringan yang normal kembali bisa dioperasikan. Contoh pemasangan switch pada jaringan distribusi dapat dilihat pada gambar 5.4.

Peralatan lain yang sangat diperlukan adalah peralatan pengaman atau proteksi. Peralatan proteksi berfungsi untuk melindungi jaringan distribusi dari bahaya kerusakan akibat adanya gangguan, baik tegangan lebih maupun arus lebih.



Gambar 5.4 Switch pada jaringan distribusi

Peralatan pengamanan pada jaringan distribusi berupa arester dan sekring. **Arester** berfungsi untuk melindungi peralatan jaringan dari tegangan lebih akibat sambaran petir. Salah satu ujung arester dihubungkan dengan kawat tegangan menengah dan ujung lainnya dihubungkan ke tanah. Prinsip kerjanya, pada saat normal arester bekerja sebagai isolator. Ketika pada jaringan terjadi tegangan lebih akibat petir, maka arester berubah watak menjadi konduktor yang baik, sehingga tegangan lebih yang terjadi dapat dinetralkan ke tanah. Setelah tegangan lebih petir hilang, maka arester kembali menjadi isolator, dan jaringan kembali beroperasi normal. Pemasangan arester untuk melindungi trafo distribusi tampak pada gambar 5.5.



Gambar 5.5 Arester sebagai pengaman trafo distribusi

**Sekring** berfungsi untuk melindungi jaringan dari bahaya kerusakan akibat arus akibat hubung singkat. Sekring terdiri dari elemen lebur yang akan meleleh ketika teraliri arus lebih akibat hubung singkat, sehingga sekring putus. Sekring yang banyak digunakan pada jaringan distribusi adalah *fuse cut out* atau FCO. FCO dipasang di dekat trafo distribusi dan pada pencabangan jaringan. Contoh pemasangannya seperti tampak pada gambar 5.6.

Peralatan pengaman lainnya adalah **recloser**, yaitu peralatan pemutus daya yang dapat menutup kembali secara otomatis ketika terjadi gangguan arus lebih. Bila gangguan yang terjadi adalah gangguan arus lebih sesaat, maka jaringan akan terputus sesaat, kemudian kembali beroperasi

normal setelah recloser menutup kembali dan gangguan telah hilang.



Gambar 5.6 Pemasangan FCO pada jaringan distribusi 3 fase

Pada jaringan distribusi kabel udara diperlukan **isolator** untuk mengisolasi tegangan antara kawat penghantar dengan tiangjaringan distribusi karena menggunakan kawat penghantar tanpa isolasi. Secara mekanis isolator berfungsi untuk menopang kawat penghantar pada tiang. Juga mengisolasi tegangan antara switch atau peralatan lain dengan tiang. Ada beberapa macam bentuk isolator pada jaringan distribusi, antara lain isolator tarik dan isolator pin untuk tegangan 20 kV, seperti tampak pada gambar 5.7.



Gambar 5.7 Isolator jenis tarik (kiri) dan jenis pin (kanan)

## **B. Trafo Distribusi**

Trafo distribusi adalah trafo daya yang dipasang antara jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah. Trafo distribusi merupakan bagian penting dari jaringan distribusi, yaitu untuk menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan keperluan pelanggan. Kapasitas trafo distribusi disesuaikan dengan jumlah daya pelanggan yang dihubungkan ke trafo tersebut. Jenis trafo yang digunakan ada yang 3 fase ada yang 1 fase disesuaikan dengan beban pelanggan. Untuk pelanggan yang relatif lebih besar digunakan trafo 3 fase agar lebih ekonomis.



Gambar 5.8 Pemasangan trafo distribusi jenis cantol

Berdasarkan kapasitas dan pemasangannya, ada beberapa cara pemasangan trafo distribusi. Untuk trafo kapasitas relatif kecil, trafo biasa dipasang dengan cara dicantolkan pada tiang tunggal, dan disebut gardu cantol. Perlengkapan trafo jenis ini dipasang jadi satu dengan trafo dayanya. Pemasangan trafo cantol seperti tampak pada gambar 5.8.

Untuk kapasitas trafo distribusi yang lebih besar dipasang pada tiang dengan ditopang dua tiang atau lebih, dan disebut gardu portal. Sedangkan pelengkapannya dipasang di bagian bawahnya untuk memudahkan pengoperasian dan pemeliharannya. Kemudian untuk

kapasitas yang lebih besar lagi, trafo distribusi lengkap dengan peralatannya kadang dipasang pada ruang bangunan, dan disebut gardu tembok.



Gambar 5.9 Gardu distribusi jenis portal



Gambar 5.10 Gardu distribusi jenis gardu



### **C. Kinerja Jaringan Distribusi**

Kinerja jaringan distribusi berkaitan dengan seberapa jauh tingkat kualitas dan keandalan tenaga listrik yang dapat dilayani oleh jaringan distribusi tersebut. Kualitas yang dimaksud dalam hal ini meliputi fluktuasi tegangan dan frekuensi yang sampai pada konsumen. Sedangkan keandalan berkaitan dengan kontinuitas pelayanan. Hal lain yang perlu diperhatikan pada jaringan distribusi adalah nilai rugi-rugi daya yang sangat dipengaruhi oleh kuat arus yang mengalir pada jaringan. Besar rugi-rugi daya akan menentukan efisiensi jaringan distribusi tersebut.

Rugi-rugi daya jaringan distribusi atau biasa disebut susut teknik merupakan fenomena yang pasti terjadi, karena suatu sistem tidak mungkin memiliki efisiensi sebesar 100%. Artinya selalu ada sebagian daya yang hilang ketika disalurkan melalui jaringan distribusi, sehingga tidak seluruh daya yang dikirimkan dapat sampai kepada konsumen. Daya yang hilang selama waktu tertentu dikatakan sebagai energi yang hilang. Daya yang hilang pada jaringan distribusi ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian, antara lain :

- Daya yang hilang pada penyulang dan kawat penghantar.
- Daya yang hilang pada transformator distribusi.
- Daya yang hilang pada persambungan (*jointing*).

### **Profil tegangan**

Profil tegangan merupakan salah satu indikator kualitas pelayanan tenaga listrik kepada pelanggan. Salah satu indikator kualitas pelayanan tenaga listrik adalah tegangan yang diterima konsumen. Tegangan yang sampai ke konsumen dinilai baik jika nilai tegangan tertinggi dan terendah masih berada dalam batas-batas toleransi yang diberikan. Tegangan yang sampai kepada konsumen akan menurun karena adanya drop tegangan pada saluran. Drop tegangan pada saluran dipengaruhi oleh besar arus yang mengalir pada jaringan dan panjang saluran. Pada siang hari umumnya daya beban relatif kecil sehingga drop tegangan juga kecil. Sebaliknya ketika malam hari, daya beban bertambah besar sehingga drop tegangan menjadi lebih besar. Inilah yang menyebabkan umumnya tegangan yang sampai konsumen di malam hari lebih rendah daripada siang hari.

Untuk melakukan perbaikan kualitas tegangan yang sampai pada konsumen dibutuhkan analisis profil tegangan pada jaringan, sehingga dapat dipilih upaya perbaikan yang tepat. Analisis dilakukan untuk mengetahui tegangan pada masing-masing bus, sehingga dapat diketahui kualitas tegangan yang sampai pada konsumen.

### **Perhitungan Susut Energi Jaringan**

Susut energi jaringan adalah perbedaan antara energi yang dikirim dari gardu induk ke jaringan distribusi dengan jumlah energi yang terjual ke pelanggan. Untuk sebuah feeder atau penyulang, susut energi dihitung dari selisih antara energi yang terukur di gardu induk dengan jumlah kWh terjual pada pelanggan yang tersambung pada penyulang tersebut. Susut energi biasanya dinyatakan sebagai nilai prosen dibandingkan dengan energi yang masuk ke jaringan.

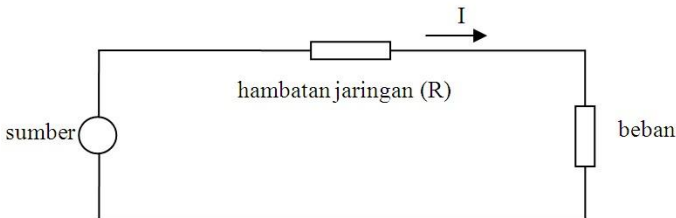
Susut energi =

Energi terukur di GI – kWh terjual pada pelanggan

$$\% \text{ Susut energi} = \frac{\text{susut energi}}{\text{Energi terukur di GI}} \times 100 \%$$

Susut energi merupakan hal yang pasti terjadi pada pengelolaan energi listrik, sehingga upaya yang dapat dilakukan hanyalah memperkecil nilainya, sehingga sistem tenaga listrik menjadi lebih efisien.

Susut energi jaringan ada dua macam, yaitu susut teknik dan susut non teknik. Susut energi teknik merupakan rugi-rugi daya yang terjadi secara alamiah karena adanya arus yang mengalir pada jaringan dan perlengkapannya. Rugi daya ini didefinisikan sebagai nilai kuadrat arus yang mengalir pada jaringan dan perlengkapannya dikalikan dengan nilai hambatannya. Rugi daya jaringan =  $I^2 \times R$ .

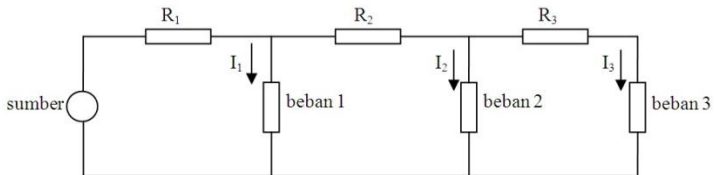


Gambar 5.11 Jaringan dengan satu sumber dan satu beban

Rugi daya ini meliputi rugi daya pada jaringan tegangan menengah (JTM), trafo, jaringan tegangan rendah (JTR) dan peralatan-peralatan lain yang digunakan pada jaringan. Upaya untuk mengurangi besarnya susut teknik antara lain dengan meningkatkan kualitas peralatan yang

digunakan pada jaringan dan mengatur agar jaringan tidak terbebani melebihi batas ekonomisnya. Bila jaringan mempunyai banyak beban, maka rugi dayanya dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Rugi daya total} = I_3^2 \times R_3 + (I_2 + I_3)^2 \times R_2 + (I_1 + I_2 + I_3)^2 \times R_1$$



Gambar 5. 12 Jaringan dengan satu sumber dan tiga beban

Susut energi non teknik lebih banyak disebabkan oleh pengukuran, pencatatan, dan pengawasan pengelolaan energi yang kurang baik. Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi susut non teknik adalah dengan memperbaiki akurasi sistem pengukuran, administrasi pencatatan dan pengawasan pemakaian energi listrik pada pelanggan.

### Perhitungan Profil Tegangan

Perbedaan nilai tegangan sumber dengan nilai tegangan beban disebabkan adanya jatuh tegangan pada jaringan. Nilai jatuh tegangan ini merupakan hasil kali arus yang mengalir pada jaringan dengan nilai impedansi

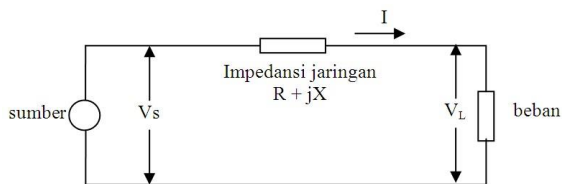
jaringan. Semakin besar arus yang mengalir pada jaringan, maka jatuh tegangan yang terjadi akan semakin besar. Juga semakin besar nilai impedansi kabel jaringan akan mengakibatkan nilai jatuh tegangan menjadi semakin besar. Dengan demikian untuk jaringan yang semakin panjang dan arus beban yang semakin besar, nilai jatuh tegangan akan semakin besar. Hal ini dapat menyebabkan profil tegangan menjadi kurang baik. Jika kita kaitkan dengan skema jaringan pada gambar 5.13, maka nilai jatuh tegangan dirumuskan:

Jatuh tegangan pada jaringan  $(V_s - V_L) = I \times (R + jX)$ ,

Dimana  $V_s$  : tegangan sumber

$V_L$  : tegangan beban

$R + jX$  : impedansi jaringan



Gambar 5.13 Skema jaringan sederhana

## **Rekonfigurasi Jaringan**

Rekonfigurasi jaringan pada jaringan distribusi merupakan perubahan susunan jaringan yang dilakukan agar unjuk kerja jaringan menjadi lebih baik. Rekonfigurasi jaringan dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain:

- Memindah suatu beban dari satu penyulang ke penyulang yang lain.
- Merubah jaringan satu fase menjadi tiga fase.
- Memasang feeder khusus untuk menghubungkan langsung dari sumber ke beban.

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam rekonfigurasi jaringan, antara lain:

- Struktur jaringan dan posisi saklar pemisah jaringan memungkinkan adanya konfigurasi.
- Ketika ada pemindahan beban antar feeder, KHA feeder dan PMT jaringan itu masih dalam range aman.
- Tegangan ujung saluran setelah rekonfigurasi masih memenuhi syarat.

**SOAL LATIHAN**

1. Jaringan distribusi terbagi menjadi jaringan kabel udara dan kabel tanah. Dengan pertimbangan apa jaringan kabel tanah digunakan, dan apa keuntungan yang diharapkan.
2. Jaringan distribusi tegangan menengah jarang digunakan untuk jaringan antar gardu induk. Jelaskan mengapa demikian.
3. Gambarkan secara sederhana jaringan distribusi sistem ring, kemudian jelaskan kelebihan dan kekurangannya dibanding dengan sistem radial.
4. Gambarkan secara sederhana suatu tiang jaringan distribusi yang menopang jaringan distribusi tegangan menengah dan tegangan rendah sekaligus, dan berikan penjelasan secukupnya.
5. Pada tiang jaringan distribusi tegangan rendah biasanya terdiri dari tiga kawat penghantar, sedang pada jaringan yang masuk ke pelanggan rumah tinggal hanya dua buah kawat, jelaskan mengapa demikian.
6. Pada trafo distribusi biasanya dipasang arester dan sekring. Jelaskan prinsip kerja dan fungsi masing-masing peralatan tersebut.



## **BAB VI**

# **KUALITAS DAN KEANDALAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

Tujuan utama sistem tenaga listrik adalah melayani kebutuhan tenaga listrik bagi para konsumen. Konsumen tentunya menginginkan tenaga listrik yang diterima sesuai dengan keinginan dan kebutuhannya. Sehingga sudah semestinya pengelola sistem tenaga listrik mengupayakan agar keinginan konsumen dapat terpenuhi. Untuk mencapai hal seperti itu diperlukan adanya standar pelayanan, sehingga pengelola dapat mengetahui bahwa tenaga listrik yang diberikan kepada konsumen sudah memenuhi standar. Demikian juga konsumen dapat mengetahui apakah tenaga listrik yang diterima telah memenuhi standar pelayanan atau belum. Jika ternyata belum memenuhi standar, maka konsumen/pelanggan dapat melakukan klaim atau menuntut agar dilakukan perbaikan kualitas pelayanan.

Standar yang digunakan untuk mengukur kualitas pelayanan tenaga listrik kepada konsumen meliputi dua hal, yaitu keandalan dan kualitas. Keandalan adalah standar

pelayanan yang berkaitan dengan kontinuitas pelayanan energi listrik kepada konsumen. Sedangkan kualitas berkaitan dengan stabilitas nilai tegangan dan frekuensi yang sampai kepada konsumen. Dengan keandalan dan kualitas tenaga listrik yang tinggi, konsumen akan dapat memanfaatkan energi listrik secara terus menerus sesuai kebutuhan dengan nyaman dan aman. Sebaliknya, keandalan yang kurang baik akan merugikan konsumen, karena akan mengganggu kegiatan atau proses produksi terutama bagi pelanggan industri. Kualitas yang kurang baik kadang mengganggu kinerja peralatan listrik yang digunakan, bahkan dapat memperpendek umur pakai peralatan listrik.

### **A. Keandalan Distribusi Tenaga listrik**

Jaringan distribusi merupakan komponen yang paling dekat dan langsung berhubungan dengan pelanggan. Dengan demikian kualitas jaringan distribusi sangat berpengaruh terhadap kualitas energi listrik yang sampai ke pelanggan. Kendala sistem distribusi merupakan standar pelayanan energi listrik yang dikaitkan dengan seberapa sering terjadi pemadaman atau pemutusan aliran listrik yang sampai ke pelanggan.

Pemadaman atau pemutusan aliran listrik terbagi dua macam, yaitu pemadaman yang direncanakan dan pemadaman yang tidak direncanakan. Pemadaman yang direncanakan meliputi pemadaman akibat adanya perawatan jaringan, perluasan jaringan atau pemadaman bergilir karena kekurangan daya pembangkitan. Kerugian di pihak pelanggan akibat pemadaman semacam ini bisa diminimalisir dengan cara menyediakan pembangkit cadangan yang dioperasikan ketika terjadi pemadaman.

Pemadaman tidak direncanakan terjadi akibat adanya gangguan pada sistem, baik gangguan dari dalam sistem maupun gangguan dari luar sistem. Gangguan dari dalam sistem dapat terjadi karena adanya hubung singkat sebagai akibat dari kerusakan peralatan. Juga adanya gangguan akibat beban lebih yang terjadi pada sistem, sehingga menyebabkan pemadaman bekerja dan aliran daya ke konsumen terputus. Pemadaman akibat gangguan semacam ini dapat mengakibatkan kerugian yang lebih besar karena kadang dapat berlangsung cukup lama menunggu perbaikan atau pemulihan. Untuk mengatasi hal ini diperlukan peralatan pemadaman yang baik dan mampu bekerja secara otomatis mengamankan gangguan yang

terjadi atau meminimalisir dampak gangguannya. Dengan demikian bila terjadi suatu gangguan pada jaringan tertentu atau lokasi tertentu, diupayakan seminimal mungkin bagian sistem yang terganggu atau terputus.

Parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat keandalan ada dua macam, yaitu seberapa sering terjadi pemadaman atau frekuensi pemadaman, dan seberapa lama waktu yang diperlukan untuk pemulihan setelah terjadi pemadaman atau durasi pemadaman. Parameter ini biasanya berupa indeks yang dihitung rata-rata dalam jangka waktu satu tahun. Beberapa indeks keandalan yang umum digunakan dalam menentukan tingkat keandalan suatu sistem distribusi tenaga listrik adalah: SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI dan ASUI

### ***SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)***

SAIFI memberikan informasi tentang frekwensi rata-rata pemadaman tiap pelanggan yang dihitung rata-rata selama satu tahun.

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{Total frekuensi pemadaman}}{\text{Total jumlah pelanggan yang dilayani}}$$

$$\text{Atau SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i}$$

dengan:  $\lambda_i$  adalah *failure rate*

$N_i$  adalah jumlah pelanggan pada titik beban  $i$ .

Besarnya nilai SAIFI dapat menggambarkan besarnya frekuensi pemadaman sistem distribusi keseluruhan ditinjau dari sisi pelanggan.

### **SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*)**

SAIDI ini adalah menggambarkan seberapa lama durasi pemadaman rata-rata yang dialami tiap pelanggan dan jangka waktu setahun.

$$SAIDI = \frac{\text{Total durasi pemadaman}}{\text{Total jumlah pelanggan yang dilayani}}$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i}$$

dengan:  $U_i$  adalah durasi pemadaman tahunan untuk beban  $i$

### **CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*)**

CAIDI menggambarkan seberapa durasi rata-rata setiap pemadaman dalam setahun.

$$\text{CAIDI} = \frac{\text{Total durasi pemadaman}}{\text{Total frekwensi pemadaman}}$$

$$\text{CAIDI} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i}$$

CAIDI juga merupakan perbandingan antara nilai SAIDI dengan nilai SAIFI:

$$\text{CAIDI} = \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIFI}}$$

Besarnya nilai CAIDI ini dapat digambarkan sebagai nilai rata-rata durasi pemadaman sistem distribusi keseluruhan ditinjau dari sisi pelanggan.

### **ASAI (Average Service Availability Index).**

ASAI menggambarkan tingkat ketersediaan layanan (suplai daya) yang diterima oleh pelanggan.

$$\text{ASAI} = \frac{\text{Jumlah durasi ketersediaan suplai daya ke pelanggan}}{\text{Jumlah durasi suplai daya yang dibutuhkan pelanggan}}$$

$$\text{ASAI} = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760}$$

Angka 8760 adalah total jumlah jam dalam 1 tahun kalender.

**ASUI (Average Service Unavailability Index)**

Indeks ini menggambarkan ketidak-tersediaan layanan (suplai daya) yang diterima pelanggan.

*ASUI*

$$= \frac{\text{Jmlh durasi ketidak – tersediaan daya ke pelanggan}}{\text{Jmlh durasi suplai daya yang dibutuhkan pelanggan}}$$

$$ASUI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760}$$

Indeks ini juga dapat dicari dengan rumus:

$$ASUI = 1 - ASAI$$

**B. Kualitas Distribusi Tenaga Listrik**

Standar pelayanan energi listrik yang diterima oleh pelanggan jaringan distribusi, selain keandalan adalah kualitas listrik. Kualitas listrik dinilai dari tingkat kestabilan tegangan dan frekuensi tenaga listrik yang diterima pelanggan. Kualitas listrik dikatakan tinggi jika tegangan dan frekuensinya stabil, artinya perubahan atau fluktuasi yang terjadi masih berada dalam batas-batas toleransi.

Perubahan tegangan yang terjadi pada tegangan distribusi yang sampai ke konsumen ada beberapa macam, yaitu tegangan lebih (*over voltage*), tegangan turun (*drop voltage*), tegangan getar (*flicker voltage*), tegangan kedip (*dip voltage*), harmonisa tegangan (*harmonic*) dan tegangan tidak seimbang (*unbalance*). Tegangan yang kurang stabil sering menjadikan peralatan listrik tidak dapat bekerja optimal, dan yang lebih merugikan kadang menjadikan umur pakai peralatan/mesin-mesin listrik menjadi lebih pendek.

Sedangkan perubahan frekuensi yang terjadi pada jaringan distribusi mengikuti frekuensi di unit pembangkit. Frekuensi sebanding dengan kecepatan putaran turbin sebagai penggerak mula yang memutar generator. Sedang putaran turbin dipengaruhi oleh besarnya beban generator dan suplai energi penggerakannya.

Frekuensi listrik yang tidak stabil dapat mengakibatkan putaran motor listrik yang digunakan untuk penggerak mesin-mesin produksi di industri manufaktur menjadi tidak stabil. Hal ini dapat merugikan pelanggan karena mengganggu proses produksi. Ada dua macam perubahan frekuensi, yaitu perubahan frekuensi yang terjadi dalam waktu yang cukup lama, biasanya diakibatkan adanya



pembebanan generator yang berlebihan dan perubahan frekuensi yang terjadi hanya beberapa saat yang seringkali akibat adanya penambahan beban mendadak yang cukup besar, atau pelepasan beban yang cukup besar. Sebagai standar kualitas dibuat toleransi perubahan sebesar 0,6 Hz dari frekuensi normal 50 Hz, atau frekuensi dikatakan masih dalam batas toleransi jika masih berada pada nilai 49,4 Hz sampai dengan 50,6 Hz.

**Tegangan lebih** yang terjadi pada jaringan distribusi sering diakibatkan adanya gangguan petir, surja hubung atau beban kapasitif berlebihan. Tegangan lebih pada sistem dapat juga terjadi akibat pengaturan arus eksitasi yang berlebihan pada generator pembangkit. Tegangan lebih pada jaringan akan mengakibatkan arus listrik yang mengalir ke beban/peralatan listrik menjadi besar. Hal ini dapat mempercepat penurunan kualitas isolasi (*deterioration of insulation*) sehingga akan memperpendek umur pakai peralatan. Bahkan bisa berlanjut dengan naiknya suhu kerja peralatan dan resiko terjadinya kebakaran. Peralatan-peralatan yang rawan kerusakan saat terjadi tegangan lebih adalah transformator, motor-motor listrik dan kapasitor. Tegangan lebih sering mengganggu operasi peralatan

kontrol yang menggunakan coil/kumparan, seperti *solenoid valve*, *magnetic switch* dan rele. Salah satu cara untuk mengurangi terjadinya tegangan lebih pada jaringan distribusi adalah dengan memasang arester pada peralatan-peralatan yang rawan terhadap gangguan tersebut.

**Tegangan turun** yang terjadi pada jaringan distribusi biasanya disebabkan oleh jaringan yang terlalu panjang atau beban trafo distribusi yang melebihi nominalnya. Jarak beban yang terlalu jauh dari trafo distribusi juga menambah besar turun tegangan yang sampai ke konsumen, atau bisa juga karena beban induktif yang berlebihan. Tegangan turun pada sistem akan mengakibatkan berkurangnya intensitas cahaya (redup) pada peralatan penerangan, terjadinya kesalahan operasi pada peralatan kendali magnetik, seperti *automatic valve*, *magnetic switch* dan rele. Turun tegangan juga dapat menyebabkan menurunnya torsi start motor-motor listrik pada saat mulai beroperasi. Cara untuk mengatasi terjadinya turun tegangan yang melebihi batas dilakukan dengan membatasi beban maksimal trafo, mengatur penempatan trafo distribusi dan memasang kapasitor sebagai kompensasi beban induktif.

**Tegangan kedip** adalah kondisi tegangan jaringan turun cukup besar hingga 20% dalam durasi waktu yang sangat singkat yaitu beberapa mili-detik. Penyebabnya adalah adanya gangguan hubungan singkat (*short circuit*) pada jaringan distribusi. Tegangan kedip dapat mengakibatkan gangguan pada kontaktor magnetik, *variable speed drive motor*, *high voltage discharge lamp* dan *under voltage relay*.

**Harmonisa tegangan** adalah komponen-komponen gelombang sinus dengan frekuensi yang lebih tinggi tetapi amplitudo relatif kecil dibanding gelombang dasarnya, sehingga bentuk gelombang tegangan menjadi cacat, tidak sinus murni. Harmonisa tegangan sering disebabkan banyaknya beban-beban non linear, yaitu beban listrik yang banyak menggunakan komponen elektronika daya seperti, penyearah dan inverter. Harmonisa tegangan dapat mengakibatkan panas yang berlebihan pada trafo karena kenaikan rugi daya, getaran keras atau suara berisik pada peralatan kapasitor daya dan gangguan pada peralatan rumah tangga. Harmonisa tegangan yang berlebihan bisa diatasi dengan memasang filter dengan kapasitas yang sesuai dengan daya beban dan nilai harmonisa yang terjadi.

**Ketidak seimbangan tegangan** hanya terjadi pada jaringan distribusi tiga fasa, yaitu adanya selisih tegangan antar fasayang cukup besar. Ketidak seimbangan tegangan ini umumnya terjadi karena pembebanan masing-masing fasa yang tidak merata. Ketidak seimbangan tegangan dapat mengakibatkan kerja motor tiga fase menjadi tidak optimal, panas berlebihan karena rugi dayanya bertambah, bahkan bisa terbakar. Dengan demikian keseimbangan beban perlu dijaga agar ketidak seimbangan tegangan pada jaringan 3 fase tidak melebihi batas toleransi.

Hal lebih penting diperhatikan dalam sistem tenaga listrik adalah faktor keamanan, baik keamanan bagi peralatan yang digunakan maupun keamanan bagi orang yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut. Upaya ini dapat dilakukan dengan cara menggunakan peralatan-peralatan listrik yang memenuhi standar di seluruh sistem mulai dari pembangkitan, penyaluran, distribusi sampai ke pengguna. Dengan demikian kerusakan peralatan yang diakibatkan tegangan atau arus lebih dapat dikurangi. Dan yang lebih penting adalah korban manusia akibat kecelakaan yang berkaitan dengan sistem tenaga listrik dapat ditekan seminimal mungkin.

**SOAL LATIHAN**

1. Apa yang dimaksud dengan keandalan suatu sistem tenaga listrik, dan apa tujuan peningkatan keandalan sistem tersebut.
2. Ada beberapa unsur keandalan sistem tenaga listrik. Sebutkan dampak yang timbul jika unsur-unsur tersebut tidak diperhatikan.
3. Pada sistem tenaga listrik tunggal, misalnya PLTD, bila beban listrik pelanggan bertambah akan berakibat tegangan yang sampai ke pelanggan menjadi lebih rendah. Jelaskan langkah pengaturan yang perlu dilakukan agar tegangan yang sampai ke pelanggan dapat kembali normal, dan juga sebaliknya bila beban pelanggan berkurang.
4. Pada sistem tenaga listrik perlu ada standar pengamanan dan perlindungan. Sebutkan hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pengamanan dan perlindungan tersebut.



## Daftar Pustaka

- Abdul Kadir, 1996, **Pembangkit Tenaga Listrik**, UI-Press, Jakarta.
- Arismunandar, Kuwahara, 1979, **Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II Saluran Transmisi**, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Arismunandar, Kuwahara, 1979, **Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid III Gardu Induk**, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Bejo, Mas, 2013, **Gardu Induk TT/TET (Switchgear)**, Ilmu Listrik.com/Tutorial dan Filosofi kelistrikan
- Djiteng marsudi, 2003, **Pembangkitan Energi listrik**, Jalamas Berkatama, Jakarta.
- Doloksaribu, Parlindungan, 2010, **Analisa keandalan sistem distribusi tenaga listrik**, Dielektrika, ISSN 2086-9487 Vol. 1. No. 1 : 20 - 24, Agustus 2010, hal 20
- Nagrath, I. J., 1994, **Power System Engineering**, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Theodore Wildi, 1981, **Electrical Power Tecnology**, John Wiley and Son, New York
- Tobing, Bonggas, 2012, **Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Kedua**, Erlangga, Jakarta
- Yon Rijono, 2004, **Teknik Tenaga Listrik**, Penerbit Andi, Yogyakarta
- Zuhal, 1995, **Dasar Teknik Tenaga Listrik**, Gramedia, Jakarta.

<https://id.scribd.com/document/242468570/STATISTIK-PLN-2013>

<http://www.djk.esdm.go.id/pdf/RUPTL/RUPTL%20PLN%202017-2026.pdf>

<http://anak-elektro-ustj.blogspot.co.id/2012/03/sistem-tenaga-listrik-pusat-pembangkit.html>

<http://45nuclearplants.com/wp-content/uploads/2015/05/student-pwr.gif>

<https://www.indonesiapower.co.id/id/produk-dan-layanan/produk/Daftar-Produk.aspx?KategoriID=1>

<http://hermaliasari.blogspot.com/2015/03/prinsip-kerja-dan-komponen-pembangkit.html>

<http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2008/09/keandalan-dan-kualitas-listrik.html>

<http://seputarbanjarpatroman.blogspot.co.id/2014/07/jenis-dan-macam-gardu-distribusi-tenaga-listrik.html>

<http://www.pln.co.id/p3bjawabali/?p=62>