

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan Penelitian Yang Pernah Dilakukan untuk mendukung penulisan skripsi ini antara lain:

- Julen Kartoni S dan Edy Ervianto (2016) melakukan penelitian mengenai Analisa Rekonfigurasi Pembebanan untuk Mengurangi Rugi-rugi Daya pada Saluran Distribusi 20 KV. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa terdapat penyulang yang mempunyai pembebanan mendekati batas toleransi standar pembebanan. Penyulang tersebut adalah penyulang bangau sakti yang merupakan salah satu penyulang dari *outgoing* gardu induk garuda sakti. Untuk mengurangi rugi daya dan drop tegangan salah satu metode yang digunakan dengan melakukan perubahan kembali rekonfigurasi yang telah ada. Dari hasil rekonfigurasi yang dilakukan rekonfigurasi 4 mendapatkan hasil bahwa pada penyulang bangau sakti jatuh tegangan yang terjadi sudah dalam batas toleransi dan rugi-rugi daya sudah semakin berkurang.
- Muhammad Fadli Biya Lubis dan Nurhalim (2016) melakukan penelitian mengenai Analisa *Alternative* Perbaikan untuk Mengatasi Drop Tegangan pada *Feeder* Kota 20 KV di Rokan Hulu. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa terdapat tiga metode perbaikan yang digunakan yaitu perbaikan

menggunakan penggantian luas penampang, perbaikan menggunakan pemasangan Kapasitor Bank, dan perbaikan menggunakan trafo pengubah tap. Dari ketiga metode perbaikan yang digunakan perbaikan pemasangan Kapasitor Bank yang paling optimal karena dapat mengurangi drop tegangan lebih besar dibandingkan metode perbaikan yang lainnya.

- Restu Dwi Cahyo (2008) melakukan penelitian mengenai Studi Perbaikan Kualitas Tegangan dan Rugi-rugi Daya pada Penyulang Pupur dan Bedak Menggunakan Bank Kapasitor, Trafo Pengubah Tap, dan Penggantian Kabel. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa perbaikan menggunakan kombinasi tiga metode perbaikan berupa pemasangan bank kapasitor, penggantian kabel, dan pengaturan tap trafo pada penyulang merupakan metode perbaikan yang paling optimal dan handal memperbaiki jatuh tegangan dan rugi-rugi daya yang terjadi pada penyulang.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Jaringan Distribusi

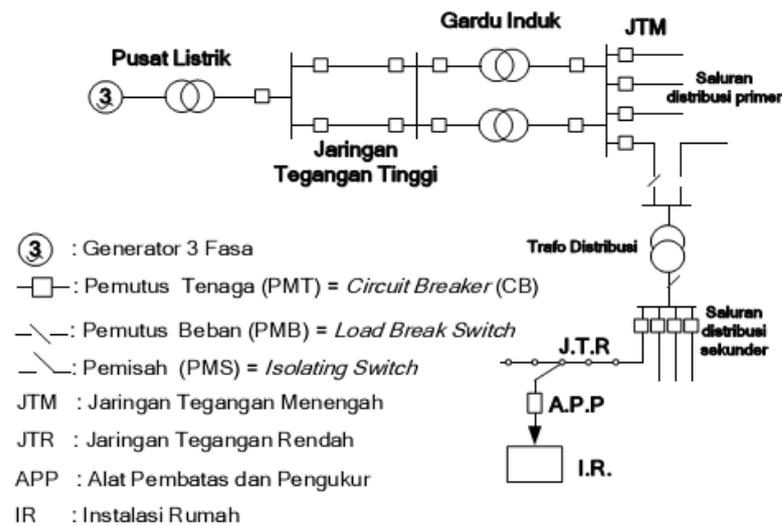
Jaringan distribusi merupakan bagian sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan, dan bertugas menyalurkan tenaga listrik dari stasiun-stasiun suplay tenaga listrik kepada pelanggan. Dalam pengoperasian sistem distribusi, masalah yang utama adalah mengatasi gangguan karena jumlah gangguan pada sistem distribusi relatif lebih banyak bila dibandingkan dengan jumlah gangguan pada sisi pembangkit maupun transmisi. Dengan memperhatikan masalah ini, maka

dalam perencanaan pengembangan sistem tenaga listrik senantiasa disertai upaya-upaya guna penyempurnaan operasi sistem distribusi.

Sistem tenaga listrik merupakan sistem sarana penyaluran tenaga listrik dari titik sumber ke titik pusat beban. Penyaluran tenaga listrik ini mempunyai peranan penting dalam menyuplai tenaga listrik ke konsumen, Hal ini dikarenakan apabila terjadi gangguan pada penyaluran tenaga listrik maka dapat mengakibatkan kerugian baik pada konsumen maupun pada PLN sendiri.

Jaringan distribusi dari gardu induk sampai ke kWh meter ditempat konsumen, terdiri dari dua bagian yaitu jaringan distribusi primer atau yang dikenal dengan jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan sekunder atau yang dikenal dengan jaringan tegangan rendah (JTR). Jaringan tegangan menengah umumnya bekerja pada tegangan 20 kV, sedangkan jaringan tegangan rendah umumnya bekerja pada tegangan 380/220 Volt.

Pengelompokan ini didasarkan pada kebutuhan tenaga listrik yang berbeda dari pelanggan. Pelanggan dengan daya tersambung besar dihubungkan dengan jaringan tegangan menengah, sedangkan pelanggan dengan daya tersambung kecil dihubungkan dengan jaringan tegangan rendah.



Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

Proses penyampaian tenaga listrik sesuai dengan Gambar 2.1 diatas yaitu dimulai dari pembangkitan tenaga listrik yaitu berupa generator 3 fasa yang dilakukan di pusat listrik, kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Sebelum disalurkan, tegangan energi listrik dinaikkan terlebih dahulu menjadi tegangan transmisi. Karena disalurkan melalui Jaringan Tegangan Tinggi, maka tegangannya dinaikkan dengan menggunakan trafo *step-up*. Kemudian disalurkan menuju gardu induk pusat. Di gardu induk pusat, tegangan diturunkan dengan menggunakan trafo *step-down*, untuk disalurkan ke sistem distribusi, melalui saluran distribusi primer (Jaringan Tegangan Menengah).

Tenaga listrik yang telah diturunkan tegangannya (menjadi 20 kV), kemudian disalurkan menuju trafo distribusi melalui Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Pada jaringan tegangan menengah terdapat alat pengaman atau proteksi berupa Pemutus Tenaga (PMT) yang berfungsi untuk memutus arus gangguan, serta

menghubungkan daya listrik. Pemutus beban (PMB) yang berfungsi untuk memutus arus listrik yang disalurkan pada beban. Kemudian pemisah (PMS) yaitu suatu alat yang berfungsi untuk memutuskan tegangan untuk memisahkan suatu peralatan listrik lainnya yang masih bertegangan dan untuk mengamankan peralatan listrik dari sisa tegangan akibat induksi dari peralatan lainnya. Selanjutnya masuk ke trafo distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan distribusi primer (20 kV) menjadi tegangan rendah (380/220 V), yang didistribusikan kekonsumen melalui Jaringan Tegangan Rendah. Konsumen tenaga listrik disambung dari Jaringan Tegangan Rendah melalui SR (Sambungan Rumah). Kemudian tenaga listrik masuk ke Alat Pembatas dan Pengukur (APP), yang berfungsi untuk membatasi daya energi listrik dan mengukur pemakaian energi listrik oleh konsumen. Setelah dari APP baru energi listrik tersebut dapat dikonsumsi oleh konsumen melalui IR (Instalasi Rumah).

2.2.2 Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer merupakan sistem yang berada diantara gardu induk dan trafo distribusi. Sebuah sistem distribusi primer terdiri dari *feeder* utama berupa rangkaian tiga fasa empat kawat atau tiga fasa tiga kawat, dan percabangan atau *lateral*, yang biasanya berupa rangkaian satu fasa atau tiga fasa yang terhubung ke *feeder* utama. Umumnya *lateral* atau *sublateral* yang berlokasi diperumahan atau pedesaan terdiri dari satu penghantar fasa dan netral.

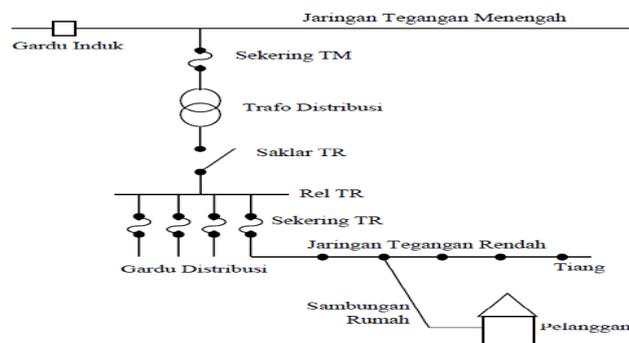
Sebuah sistem distribusi primer dibagi menjadi beberapa bagian menggunakan penutup balik otomatis (PBO-*automatic circuit recloser*), *Air Break*

Swicth (ABSW), atau *Load Break Swicth* (LBS) pada beberapa lokasi agar ketika terjadi gangguan maka jaringan yang mengalami gangguan tersebut dapat dipisahkan sehingga dapat pula meminimalisasi banyak pelanggan padam.

Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer 20 kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (*Loop*), Jaringan Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster.

2.2.3 Jaringan Pada Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.2 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2. 2 Hubungan Tegangan Menengah ke Tegangan Rendah dan Konsumen
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini selain berfungsi menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta

mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. Mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan.

Jatuh tegangan pada sistem distribusi mencakup jatuh tegangan pada:

1. Penyulang Tegangan Menengah (TM)
2. Transformator Distribusi
3. Penyulang Jaringan Tegangan Rendah
4. Sambungan Rumah
5. Instalasi Rumah.

Jatuh tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Jatuh tegangan yang diijinkan tidak boleh lebih dari 5% ($\Delta V \geq 5\%$). Secara umum ΔV dibatasi sampai dengan 3,5%.

2.2.4 Komponen Pada Sistem Distribusi

Sistem distribusi adalah keseluruhan komponen dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan secara langsung antara sumber daya yang besar (seperti pada gardu transmisi) dengan konsumen tenaga listrik. Secara umum yang termasuk kedalam sistem distribusi antara lain :

1. Gardu Induk

Gardu induk merupakan unit di dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menerima daya dari sistem transmisi untuk kemudian diteruskan sistem

distribusi. Didalam Gardu Induk ini tegangan dari sistem transmisi (150 kV-500kV) akan diubah tegangan untuk distribusi (20 kV)

2. Jaringan Subtransmisi

Jaringan subtransmisi merupakan jaringan yang berfungsi untuk mengalirkan daya dari GI menuju gardu gardu distribusi. Namun jaringan subtransmisi belum tentu ada diseluruh sistem distribusi, karena jaringan subtransmisi merupakan jaringan dengan tegangan peralihan. Seandainya pada jaringan transmisi tegangan yang dipakai adalah 500 kV, maka setelah masuk GI tegangan menjadi 150 kV (belum termasuk tegangan untuk distribusi). Sehingga jaringan ini dinamakan subtransmisi karena masih bertegangan tinggi.

3. Gardu Distribusi Utama

Gardu distribusi merupakan unit dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari GI atau jaringan subtransmisi untuk kemudian disalurkan kepada penyulang primer atau langsung kepada konsumen.

4. Saluran Penyulang Utama

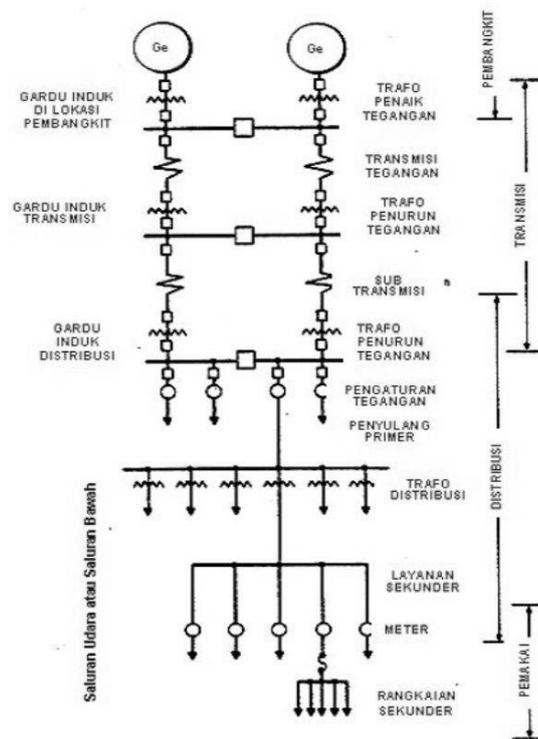
Saluran penyulang utama merupakan rangkaian yang berfungsi untuk menghubungkan antara gardu distribusi utama dengan gardu transformator distribusi atau menghubungkan GI dengan gardu transformator distribusi.

5. Transformator Distribusi

Transformator distribusi berada didalam gardu distribusi. Berfungsi untuk mengubah tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V). Kemudian daya dengan tegangan rendah tersebut disalurkan kepada konsumen.

6. Rangkaian Sekunder

Rangkaian sekunder merupakan rangkaian yang berasal dari gardu gardu distribusi yang berfungsi untuk melayani konsumen yang tersebar di sepanjang simpul simpul distribusi.



Gambar 2. 3 Komponen Penyusun Sistem Distribusi
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

2.2.5 Struktur Jaringan Distribusi

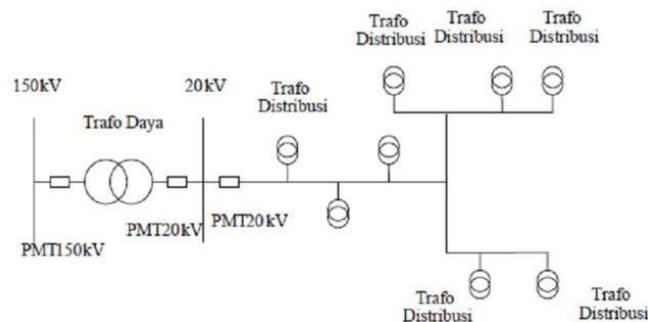
Pada umumnya struktur jaringan distribusi dapat dibagi menjadi empat jenis, antara lain :

1. Jaringan Radial
2. Jaringan Lingkaran
3. Jaringan Spindel

4. Jaringan Anyaman

2.2.5.1 Struktur Jaringan Radial

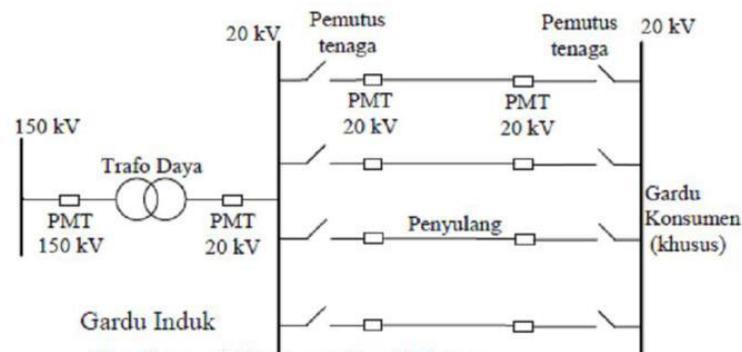
Struktur jaringan distribusi radial adalah struktur jaringan yang paling sederhana, baik ditinjau dari perencanaannya maupun dari pengusahaannya. Penyaluran tenaga listrik dari penyulang berada pada kondisi satu arah. Akibatnya apabila terjadi gangguan pada salah satu titik pada rangkaian akan menyebabkan keseluruhan jaringan akan terkena dampaknya. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik pada jaringan dengan struktur seperti ini sangat buruk. Karena apabila terjadi perbaikan pada salah satu titik akan menyebabkan seluruh jaringan harus dipadamkan.



Gambar 2. 4 Struktur Jaringan Radial
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

Untuk kontinuitas penyaluran yang lebih baik, maka struktur jaringan seperti ini dikembangkan menjadi struktur jaringan radial ganda. Pada struktur jaringan radial ganda, setiap gardu distribusi mendapat suplay dari dua penyulang radial yang berasal dari GI atau dari gardu distribusi lainnya. Dalam keadaan iperasi normal, maka gardu hanya mendapat suplay tenaga listrik dari satu penyulang saja.

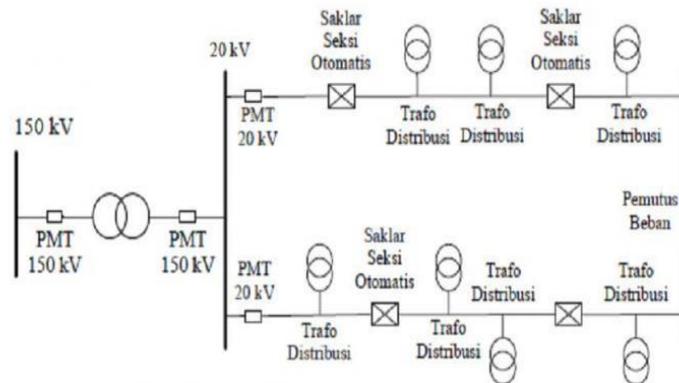
Namun apabila terjadi gangguan, maka jaringan akan dipindahkan kepenyulang lainnya. Sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dapat diperbaiki.



Gambar 2. 5 Struktur Jaringan Radial Ganda
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

2.2.5.2 Struktur Jaringan Lingkaran

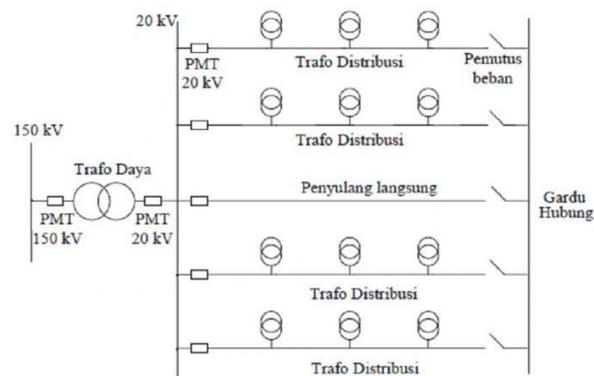
Struktur jaringan distribusi lingkaran merupakan struktur jaringan distribusi tertutup yang dimulai dari sumber daya besar (GI) kemudian melewati beberapa gardu gardu distribusi kemudian kembali lagi menuju sumber semula. Kelebihan utama dari struktur jaringan distribusi ini adalah apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut dapat diisolir sehingga tidak mengganggu jaringan distribusi secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi karena pada struktur jaringan distribusi lingkaran ini terdapat dua titik yang dapat disambungkan secara bergantian atau secara bersamaan. Sehingga kontinuitas penyaluran sudah cukup baik. Walaupun apabila terjadi gangguan pada banyak titik pada rangkaian/serentak, maka keseluruhan jaringan dapat terganggu juga.



Gambar 2. 6 Struktur Jaringan Lingkaran / LOOP
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

2.2.5.3 Struktur Jaringan Spindel

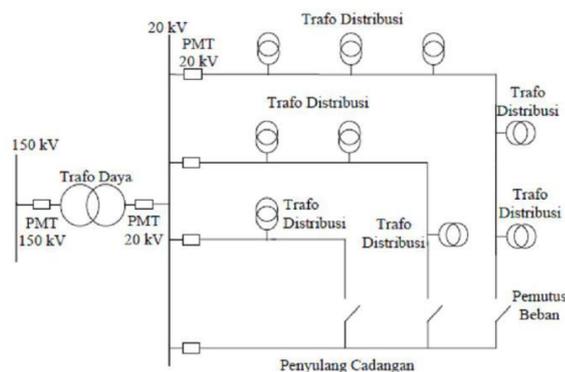
Struktur jaringan spindel merupakan hasil pengembangan dari struktur jaringan distribusi radial dan struktur jaringan distribusi lingkaran. Pada struktur jaringan spindel ini penyulang utama yang dipakai bertambah banyak jumlahnya serta memiliki penyulang cadangan. Konfigurasi yang umum dipakai untuk struktur jaringan distribusi spindel adalah tujuh buah penyulang utama dan satu buah penyulang cadangan. Seluruh penyulang ini bertemu pada satu titik yang menghubungkan seluruh penyulang penyulang utama dengan penyulang cadangan. Penyulang cadangan merupakan saluran khusus yang dilengkapi pemutus dan pemisah daya. Titik temu penyulang penyulang utama dengan penyulang cadangan berada pada sebuah gardu hubung. Penyulang cadangan berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik darurat apabila saluran penyulang utama ada yang mengalami gangguan. Dalam keadaan operasi normal, maka penyulang cadangan ini tidak terhubung dengan beban.



Gambar 2. 7 Struktur Jaringan Spindel
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

2.2.5.4 Struktur Jaringan Anyaman

Struktur jaringan distribusi anyaman merupakan bentuk jaringan yang paling rumit apabila dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Untuk setiap gardu distribusi akan mendapat suplay tenaga listrik dari dua atau lebih penyulang, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listriknya jauh lebih baik dibandingkan struktur jaringan distribusi yang lain. Namun struktur jaringan distribusi jenis ini memiliki biaya investasi yang lebih mahal dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Struktur ini biasanya digunakan untuk daerah yang memerlukan tingkat kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang tinggi seperti pada daerah industri yang memerlukan suplay konstan.



Gambar 2. 8 Struktur Jaringan Anyaman
(Sumber : Hardiansyah, 2016)

2.2.6 Distribusi Tenaga Listrik

Terdapat dua cara dalam distribusi tenaga listrik ke daerah pemukiman, antara lain melalui gardu distribusi atau melalui penyaluran setempat.

2.2.6.1 Gardu Distribusi

Penyaluran daya dengan menggunakan gardu distribusi menggunakan sistem tiga fasa untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR) dengan transformator tiga fasa dengan kapasitas yang cukup besar. Jaringan tegangan rendah ditarik dari sisi sekunder transformator untuk kemudian disalurkan kepada konsumen. Sistem tiga fasa tersedia untuk seluruh daerah pelayanan distribusi, walaupun sebagian besar konsumen mendapat pelayanan distribusi tenaga listrik satu fasa. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa tiga kawat. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa empat kawat dengan netral.

2.2.6.2 Penyaluran Setempat

Penyaluran daya dengan menggunakan penyaluran setempat umumnya digunakan pada daerah-daerah dengan kondisi beban perumahan tidak terlalu besar, atau pada suatu daerah dengan tingkat pertumbuhan beban yang tinggi. Untuk jaringan tegangan menengahnya menggunakan sistem tiga fasa dengan percabangan satu fasa. Sementara untuk jaringan tegangan menengahnya menggunakan sistem satu fasa. Transformator yang digunakan memiliki kapasitas yang kecil dan cenderung dekat dengan konsumen. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa empat kawat dengan netral. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa tiga kawat bersama netral.

2.2.7 Tegangan Distribusi

Tegangan untuk jaringan distribusi dapat dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain :

2.2.7.1 Tegangan Menengah (TM)

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai 1 kV sampai dengan 30 kV. Untuk di Indonesia menggunakan tegangan menengah sebesar 20 kV. Tegangan menengah dipakai untuk penyaluran tenaga listrik dari GI menuju gardu gardu distribusi atau langsung menuju pelanggan tegangan menengah.

2.2.7.2 Tegangan Rendah (TR)

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai dibawah 1 kV yang digunakan untuk penyaluran daya dari gardu gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah. Penyaluran dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fasa empat kawat yang dilengkapi netral. Di Indonesia menggunakan tegangan rendah 380/220 V. Dengan 380 V merupakan besar tegangan antar fasa dan tegangan 220 V merupakan tegangan fasa –netral.

2.2.7.3 Tegangan Pelayanan

Tegangan pelayanan merupakan ketetapan dari penyedia tenaga listrik untuk pelanggan pelanggannya. Di indonesia besarnya tegangan pelayanan pada umumnya antara lain :

- a. 380/220 V tiga fasa empat kawat
- b. 220 V satu fasa dua kawat
- c. 6 kV tiga fasa tiga kawat
- d. 12 kV tiga fasa tiga kawat
- e. 20 kV tiga fasa tiga kawat

2.2.8 Daya Listrik

Beban merupakan bagian yang dilayani oleh sistem tenaga. Daya yang dibangkitkan pusat-pusat pembangkit kemudian disalurkan agar dapat sampai ke titik-titik beban. Daya yang diterima beban yakni daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dan diusahakan memiliki tegangan tidak jauh dari rating agar tidak merusak peralatan-peralatan atau beban-beban (Laurentius, 2013).

2.2.8.1 Pengertian Daya

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan watt atau *Horsepower* (HP), *Horsepower* merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 watt atau lbf/second. Sedangkan watt merupakan unit daya listrik dimana 1 watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1 ampere dan tegangan 1 volt (Laurentius, 2013).

2.2.8.2 Daya Aktif

Daya aktif (*actif power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Misalnya energi panas, cahaya, mekanik dan lain-lain (Laurentius, 2013).

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_P \times \cos \varphi \quad (2.1)$$

Keterangan : V_P = tegangan antar fase

I_P = arus per fase

$\cos \varphi$ = faktor daya

Daya yang digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

2.2.8.3 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk membentuk medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan

magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar dan lain-lain. Satuan daya reaktif adalah Var (Laurentius, 2013).

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_P \times \sin \varphi \quad (2.2)$$

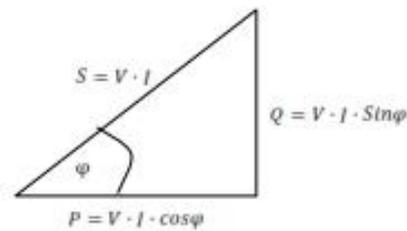
Keterangan : V_P = tegangan antar fase

I_P = arus perfase

$\sin \varphi$ = faktor daya reaktif

2.2.8.4 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms dan arus rms dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Satuan daya nyata adalah VA (Laurentius, 2013).



Gambar 2. 9 Penjumlahan trigonometri daya aktif, reaktif dan semu
(Sumber : <https://electrical17.wordpress.com/2011/03/05/247/>)

Hubungan ketiga besaran daya tersebut dinyatakan dengan:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ atau } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

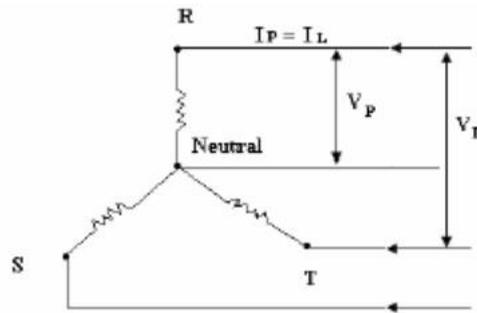
Atau sering dinyatakan dalam bentuk:

$$S = P + jQ \quad (2.4)$$

Keterangan : S = daya semu
 P = daya aktif
 Q = daya reaktif

Sedangkan untuk rangkaian 3 fase mempunyai 2 bentuk hubungan yaitu :

- Hubungan Wye



Gambar 2. 10 Hubungan bintang
 (Sumber : <https://electrical17.wordpress.com/2011/03/05/247/>)

Dimana :

$V_{RS} = V_{RT} = V_{ST} = V_L$; tegangan antar fase

$V_{RN} = V_{SN} = V_{TN} = V_P$; tegangan fase

$I_R = I_S = I_T = I_L (I_P)$; arus fase / arus saluran

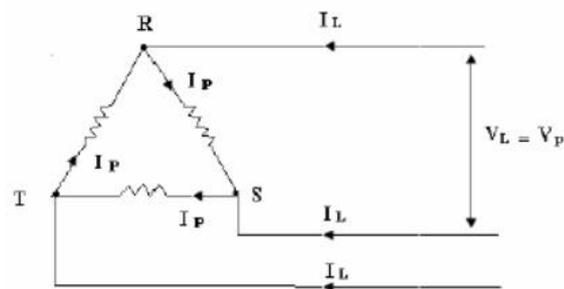
Bila I_L adalah arus saluran dan I_P adalah arus fase, maka akan berlaku

hubungan:

$I_L = I_P$

$V_L = \sqrt{3} \cdot V_P$

- Hubungan delta



Gambar 2. 11 Hubung delta

(Sumber : <https://electrical17.wordpress.com/2011/03/05/247/>)

Dimana :

$I_{RS} = I_{RT} = I_{ST} = I_P$; arus fase

$I_R = I_S = I_T = I_L$; arus saluran

$V_{RS} = V_{RT} = V_{ST} = V_L (V_P)$; tegangan antar fase

Bila V_L adalah tegangan antara fase dan V_P adalah tegangan fase maka berlaku hubungan:

$$V_L = V_P$$

$$I_L = \sqrt{3}.I_P$$

2.2.9 Faktor Daya

Faktor daya (*cos*) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya nyata (VA) yang digunakan dalam sirkuit AC atau beda sudut fase antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \varphi$ (Laurentius, 2013).

Faktor daya = daya aktif (P) / daya semu (S)

$$= kW / kVA$$

$$= V.I \cos \varphi / V.I$$

$$= \cos \varphi$$

Dimana : P = daya aktif (kW)
 S = daya semu (kVA)
 Cos φ = faktor daya

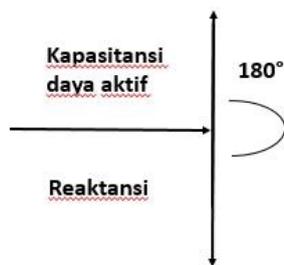
Faktor daya mempunyai nilai range antara 0 – 1 dan dapat juga dinyatakan dalam persen. Faktor daya yang bagus apabila bernilai mendekati satu.

Beberapa keuntungan meningkatkan faktor daya:

- Tagihan listrik akan menjadi kecil (PLN akan memberikan denda jika *pf* lebih kecil dari 0,85).
- Kapasitas distribusi sistem tenaga listrik akan meningkat.
- Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem.
- Adanya peningkatan tegangan karena daya meningkat.

Jika *pf* lebih kecil dari 0,85 maka kapasitas daya aktif (kW) yang digunakan akan berkurang. Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan menurunnya *pf* sistem kelistrikan. Akibat menurunnya *pf* maka akan timbul beberapa persoalan diantaranya (Laurentius, 2013):

- Membesarnya penggunaan daya listrik kWh karena rugi-rugi.
- Membesarnya penggunaan daya listrik kVAr.
- Mutu listrik menjadi rendah karena jatuh tegangan (*voltage drops*).

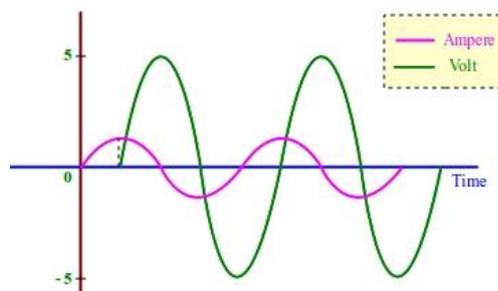


Gambar 2. 12 Hubungan daya aktif, reaktif dan kapasitansi
(Sumber : <http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/123971-R030808.pdf>)

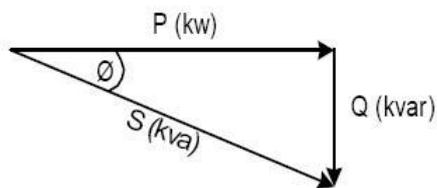
Seperti terlihat pada gambar 2.12, daya reaktif yang dibutuhkan oleh induktansi selalu mempunyai beda fasa 90° dengan daya aktif. Kapasitor menyuplai kVAR dan melepaskan energi reaktif yang dibutuhkan oleh induktor. Ini menunjukkan induktansi dan kapasitansi mempunyai beda fasa 180° . Faktor daya sendiri terdiri dari dua sifat yaitu faktor daya “*leading*” dan faktor daya “*lagging*”.

2.2.9.1 Faktor daya “*leading*”

Apabila arus mendahului tegangan, maka faktor daya ini dikatakan “*leading*”. Faktor daya *leading* ini terjadi apabila bebannya kapasitif, seperti *capacitor*, *synchronocus generator*, *synchronocus motors* dan *synchronocus condenser* (Laurentius, 2013).



Gambar 2. 13 Faktor daya *leading*
(Sumber : <http://www.elektronikabersama.web.id/2012/10/mengenal-istilah-lagging-dan-leading.html>)

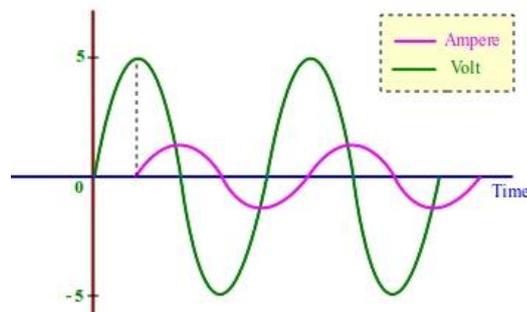


Gambar 2. 14 Segitiga daya beban kapasitif

(Sumber : <http://teguhpati.blogspot.co.id/2012/10/kapasitor-daya.html>)

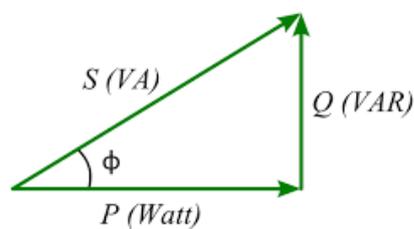
2.2.9.2 Faktor daya “lagging”

Apabila tegangan mendahului arus, maka faktor daya ini dinyatakan “lagging”. Faktor daya *lagging* ini terjadi apabila bebannya induktif, seperti motor induksi, AC dan transformator (Laurentius, 2013).



Gambar 2. 15 Faktor daya *lagging*

(Sumber : <http://www.elektronikabersama.web.id/2012/10/mengenal-istilah-lagging-dan-leading.html>)



Gambar 2. 16 Segitiga daya beban induktif

(Sumber : <https://mastermepengineering.wordpress.com/2015/03/27/segitiga-daya/>)

2.2.10 Beban Listrik

Dalam suatu rangkaian listrik selalu dijumpai suatu sumber dan beban. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Reaktansi induktif (X_L) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan *short circuit*. Reaktansi kapasitif (X_C) akan menjadi tak berhingga yang berarti bahwa kapasitif tersebut akan *open circuit*. Jadi sumber DC akan mengakibatkan beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian. Bila sumber listrik AC maka beban dibedakan menjadi 3 sebagai berikut (Laurentius, 2013):

2.2.10.1 Beban Resistif

Beban resistif merupakan suatu resistor murni, contoh: lampu pijar, pemanas. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan tidak menyerap daya reaktif sama sekali. Tegangan dan arus sefasa. Secara matematis dinyatakan (Laurentius, 2013):

$$R = V / I \quad (2.5)$$

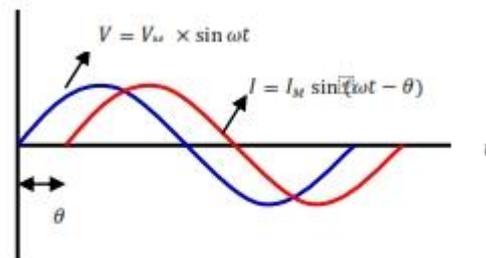


Gambar 2. 17 Arah dan tegangan padap beban resistif
(Sumber : <http://teknikelektro.org/sifat-beban-listrik/>)

2.2.10.2 Beban Induktif

Beban induktif adalah beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah inti biasanya inti besi, contoh: motor-motor listrik, induktor dan transformator. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 - 1 “*lagging*”. Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVar). Tegangan mendahului arus sebesar φ° . secara sistematis dinyatakan (Laurentius, 2013):

$$X_L = 2\pi f.L \quad (2.6)$$

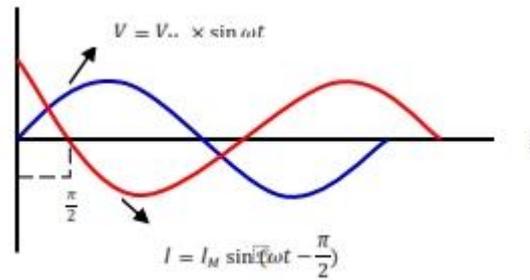


Gambar 2. 18 Arus, tegangan dan GGL induksi pada beban induktif
(Sumber : <http://teknikelektro.org/sifat-beban-listrik/>)

2.2.10.3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif adalah beban yang mengandung suatu rangkaian kapasitor. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 - 1 “*leading*”. Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan mengeluarkan daya reaktif (kVar). Arus mendahului tegangan sebesar φ° . secara matematis dinyatakan (Laurentius, 2013):

$$X_C = 1 / 2\pi f.C \quad (2.7)$$



Gambar 2. 19 Arus, tegangan dan GGL induksi pada beban kapasitif
(Sumber : <http://teknikelektro.org/sifat-beban-listrik/>)

2.2.11 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti.

Jatuh tegangan secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Jatuh tegangan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Jatuh tegangan (ΔV) pada penghantar semakin besar jika arus (I) didalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar ($R\ell$) semakin besar pula. Jatuh tegangan merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat

menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada dibawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas dasar hal tersebut maka jatuh tegangan yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya.

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan V_R (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh rumus:

$$V_R = \left(\frac{V_s - V_r}{V_r} \right) \times 100\% \quad (2.8)$$

Keterangan: V_R = regulasi tegangan
 V_s = tegangan sisi pengirim
 V_r = tegangan sisi penerima

Umumnya beban yang terdapat pada sistem tenaga listrik bersifat resistif-induktif. Beban tersebut akan menyerap daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan oleh generator. Penyerapan daya reaktif yang diakibatkan oleh beban induktif akan menyebabkan timbulnya jatuh tegangan pada tegangan yang disuplai generator. Akibatnya nilai tegangan di sisi penerima akan berbeda dengan nilai tegangan di sisi pengirim (Cahyo, 2008). Persamaan jatuh tegangan dapat dilihat pada persamaan 2.9 Dan 2.10 berikut:

$$V_{s1\emptyset} = V_{r1\emptyset} + \Delta V_{p1\emptyset} \quad (2.9)$$

Dan untuk persamaan 3 fase menjadi:

$$V_{S3\phi} = (\sqrt{3} \times V_{r1\phi}) + (\sqrt{3} \times \Delta V_{p1\phi}) \quad (2.10)$$

Keterangan : $V_{S3\phi}$ = tegangan di sisi pengirim antar fase (Volt)

$V_{S1\phi}$ = tegangan di sisi pengirim perfase (Volt)

$V_{r1\phi}$ = tegangan di sisi penerima perfase (Volt)

$\Delta V_{p1\phi}$ = jatuh tegangan perfase (Volt)

Dimana:

$$\Delta V_{p1\phi} = (I_p R \cos \theta + I_p X \sin \theta) \times L \quad (2.11)$$

Dan untuk persamaan 3 fase menjadi:

$$\Delta V_{p3\phi} = \sqrt{3} \times (I_p R \cos \theta + I_p X \sin \theta) \times L \quad (2.12)$$

Sehingga persamaan tegangan di sisi pengirim ($V_{S1\phi}$) menjadi:

$$V_{S1\phi} = V_{r1\phi} + (I_p R \cos \theta + I_p X \sin \theta) \times L \quad (2.13)$$

Dan untuk persamaan tegangan di sisi pengirim ($V_{S3\phi}$) menjadi:

$$V_{S3\phi} = (\sqrt{3} \times V_{r1\phi}) + (\sqrt{3} \times (I_p R \cos \theta + I_p X \sin \theta) \times L) \quad (2.14)$$

Keterangan: $V_{S3\phi}$ = tegangan di sisi pengirim antar fase (Volt)

$V_{S1\phi}$ = tegangan di sisi pengirim perfase (Volt)

$V_{r1\phi}$ = tegangan di sisi penerima perfase (Volt)

$\Delta V_{p1\phi}$ = jatuh tegangan perfase (Volt)

$\Delta V_{p3\phi}$ = jatuh tegangan antar fase (Volt)

I_p = arus perfase (Ampere)

R = resistansi penghantar (Ω/km)

X = reaktansi penghantar (Ω/km)

L = panjang penghantar (km)

$\cos \theta$ = faktor daya

$\sin \theta$ = faktor daya reaktif

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya drop tegangan:

- a. Besarnya arus yang mengalir
- b. Banyaknya beban yang terhubung
- c. Kualitas pemasangan konektor
- d. Keseimbangan beban
- e. Jenis penghantar yang digunakan

Dampak yang diakibatkan oleh drop tegangan:

- a. Penurunan level iluminasi pada lampu sehingga menjadi redup
- b. Pemanasan menjadi lebih lambat (pada setrika, kompor listrik dll)
- c. Kesulitan pada waktu starting motor

Cara-cara yang ditempuh untuk mengurangi besarnya drop tegangan pada jaringan distribusi:

- a. Memperbaiki kualitas pemasangan konektor

Perbaikan kualitas pemasangan konektor akan berdampak memperbaiki jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi, dimana perbaikan ini akan mempengaruhi nilai resistansi. Semakin baik pemasangan konektor maka nilai resistansinya akan semakin kecil dan konduktivitas konduktor akan lebih baik dan juga akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Maka tegangan dan daya di sisi penerima akan semakin baik.

- b. Pembangunan *feeder express*

Pembangunan *feeder express* akan mengurangi arus yang mengalir pada jaringan. Hal ini akan berdampak perbaikan terhadap berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi. Berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya akan menaikkan tegangan dan daya yang diterima di sisi beban. Pembangunan *feeder express* dibangun untuk beban yang menginginkan tegangan yang konstan dan daya yang sama seperti daya yang dikirim. Pembangunan *feeder express* biasanya dibangun karena pada jaringan sebelumnya terdapat jatuh tegangan dan rugi daya yang besar yang mengakibatkan daya di sisi terima beban menjadi berkurang.

c. Pembangunan gardu baru

Pembangunan gardu baru dapat dilakukan pada sistem distribusi dengan nilai jatuh tegangan dan rugi daya yang cukup besar akibat penghantar yang terlalu panjang dan perkembangan beban yang tinggi. Pembangunan gardu baru bertujuan untuk membagi jaringan distribusi yang panjang dan beban yang banyak. Dengan membagi panjang jaringan dan beban akan mempengaruhi arus yang mengalir akan semakin kecil dan memperpendek jaringan distribusi ke beban. Hal ini akan berdampak terhadap berkurangnya rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi. Berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya akan menaikkan tegangan dan daya yang diterima di sisi beban.

d. Pemasangan kapasitor bank untuk beban bersifat induktif

Perbaikan profil tegangan dan rugi daya dapat dilakukan dengan menggunakan kapasitor bank. Umumnya beban yang terdapat pada jaringan

distribusi bersifat resistif-induktif. Jadi dalam beban terdapat arus resistif dan arus induktif yang mengalir. Pemasangan kapasitor akan mengalirkan arus kapasitif. Sebagian besar arus induktif pada beban induktif akan terkompensasi oleh arus kapasitif dari kapasitor bank. Jadi pada beban induktif setelah pemasangan kapasitor bank, arus total yang mengalir akan semakin kecil atau bisa dikatakan hanya terdapat arus resistif pada jaringan. Semakin kecilnya arus yang mengalir akan berdampak terhadap perubahan jatuh tegangan dan rugi daya. Semakin kecil arus yang mengalir pada jaringan distribusi maka jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Dengan kecilnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi maka tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan suplai daya akan semakin besar pula. Selain memperkecil arus yang mengalir memasang kapasitor bank juga dapat meningkatkan nilai faktor daya. Sebab dengan memasang kapasitor bank, akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban.

e. Mengubah *Load Tap Changer*

Perbaikan profil tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan metode pengaturan tegangan berupa penggunaan *load tap changer*. Dengan menggunakan *load tap changer* dapat mengatur rasio lilitan primer dan sekunder trafo. Dengan demikian kita dapat mengatur tegangan keluaran trafo. Mengubah *tap changer* hanya akan mempengaruhi nilai tegangannya saja, dimana mengubah *tap changer* akan menaikkan tegangan keluaran (sekunder) dan mengakibatkan tegangan di sisi terima beban akan terjadi

kenaikan pula. Dampak perbaikan profil tegangan dengan *load tap changer* tidak akan merubah besarnya nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi. Karena arus yang mengalir pada jaringan distribusi dan impedansi pada jaringan sama seperti keadaan sebelum dilakukannya perubahan *tap changer*.

- f. Mengganti jenis penghantar dan memperbesar luas penampang penghantar
Pengaruh kawat penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi daya adalah berkaitan terhadap nilai resistansi jaringan pada penghantar. Dimana dampak yang terjadi jika nilai resistansi jaringan semakin besar akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi semakin besar kemudian akan mengakibatkan tegangan di sisi penerima beban akan semakin kecil dan daya yang dikirim akan berkurang. Oleh sebab itu untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi dilakukan dengan cara memperkecil nilai resistansi jaringan. Hal itu dapat dilakukan dengan mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan nilai konduktivitas yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah atau memperbesar ukuran kabel yang artinya akan memperbesar luas penampang dan memperkecil nilai resistansinya.

2.2.12 Rugi-rugi Daya

Rugi daya adalah besarnya daya yang hilang dalam penyaluran daya listrik yang dikirim oleh sumber daya listrik utama ke suatu beban. Rugi daya pada jaringan distribusi diakibatkan oleh rugi-rugi teknis pada jaringan, dimana rugi-rugi

teknis ini dipengaruhi oleh besarnya resistansi dan reaktansi penghantar dalam bentuk rugi daya aktif dan rugi daya reaktif. Rugi daya aktif yang timbul akibat besarnya arus dan nilai resistansi penghantar akan terdisipasi dalam bentuk energi panas. Sedangkan rugi daya reaktif yang timbul akibat besarnya arus dan nilai reaktansi akan terdisipasi dalam bentuk medan magnetik. Rugi daya teknis tidak dapat dihilangkan tetapi dapat diperkecil dengan berbagai usaha seperti perbaikan penambahan kapasitor bank dan penggantian penghantar tetapi usaha ini membutuhkan investasi yang cukup besar sehingga diperlukan lagi usaha yang strategis dan sistematis serta skala prioritas. Sedangkan rugi daya non teknis pada umumnya adalah pemakaian listrik secara ilegal, kesalahan pencatatan alat ukur transaksi energi listrik, akurasi peralatan ukur dan kelemahan sistem administrasi sehingga upaya-upaya penurunannya relatif lebih mudah dan tidak memerlukan biaya besar.

Rugi daya teknis yang biasa terjadi pada jaringan distribusi dinyatakan dengan persamaan 2.15 berikut:

$$P_{losses1\phi} = I_p^2 \times R \times L \quad (2.15)$$

Dan untuk menghitung rugi-rugi daya aktif 3 fase dinyatakan dengan persamaan 2.16:

$$P_{losses3\phi} = 3 \times I_p^2 \times R \times L \quad (2.16)$$

Keterangan : $P_{losses1\phi}$ = rugi daya 1 fase (kW)
 $P_{losses3\phi}$ = rugi daya 3 fase (kW)
 I_p = arus perfase (A)

R = tahanan saluran (Ω/km)

L = panjang saluran (km)

Sedangkan untuk mengetahui besar nilai rugi daya listrik dinyatakan dengan Persamaan 2.17 dan 2.18 berikut:

$$P_{Losses1\phi} = P_{S1\phi} - P_{R1\phi} \quad (2.17)$$

Dan untuk persamaan 3 fasa menjadi:

$$P_{Losses3\phi} = 3 \times (P_{S1\phi} - P_{R1\phi}) \quad (2.18)$$

dengan :

- $P_{R1\phi}$ = Daya yang dipakai perfase (kW)
- $P_{S1\phi}$ = Daya yang dikirimkan perfase (kW)
- $P_{Losses1\phi}$ = rugi daya 1 fasa (kW)
- $P_{Losses3\phi}$ = rugi daya 3 fasa (kW)

Persamaan diatas digunakan untuk menghitung rugi daya aktif pada jaringan. Sedangkan untuk menghitung rugi daya reaktif pada jaringan distribusi dapat menggunakan persamaan 2.19 berikut:

$$Q_{losses1\phi} = I_P^2 \times X \times L \quad (2.19)$$

Dan untuk menghitung rugi daya reaktif 3 fasa dinyatakan dalam persamaan 2.20

:

$$Q_{losses3\phi} = 3 \times I_P^2 \times X \times L \quad (2.20)$$

Keterangan : $Q_{losses1\phi}$ = rugi daya reaktif 1 fasa (kVar)

$Q_{losses3\phi}$ = rugi daya reaktif 3 fasa (kVar)

I_P	= arus perfase (A)
X	= reaktansi saluran (Ω/km)
L	= panjang saluran (km)

Sedangkan untuk mengetahui besar nilai rugi daya reaktif dinyatakan dengan Persamaan 2.21 dan 2.22 berikut:

$$Q_{Losses1\phi} = Q_{S1\phi} - Q_{R1\phi} \quad (2.21)$$

Dan untuk persamaan 3 fasa menjadi:

$$Q_{Losses3\phi} = 3 \times (Q_{S1\phi} - Q_{R1\phi}) \quad (2.22)$$

dengan :	$Q_{R1\phi}$	= Daya reaktif yang dipakai perfase (kVar)
	$Q_{S1\phi}$	= Daya reaktif yang dikirimkan perfase (kVar)
	$Q_{Losses1\phi}$	= rugi daya reaktif 1 fasa (kVar)
	$Q_{Losses3\phi}$	= rugi daya reaktif 3 fasa (kVar)

Rugi daya merupakan persoalan krusial yang dihadapi oleh PLN dan belum dapat sepenuhnya terpecahkan. Pemadaman bergilir kemudian dilakukan untuk menghindarkan sistem mengalami pemadaman total (*totally black out*). Persoalan kualitas daya merupakan persoalan lain yang diantaranya disebabkan oleh kekurangan pasokan daya listrik. Persoalan ini meliputi profil tegangan yang buruk, frekuensi tegangan yang tidak stabil serta distorsi harmonik yang berlebihan. Ketika kontinuitas pasokan masih merupakan persoalan, hal-hal yang berkaitan dengan persoalan kualitas daya untuk sementara dapat "diabaikan" yang kemudian mengherankan adalah ketika data di lapangan menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit yang tersedia lebih dari cukup untuk memikul beban yang ada.

Kesimpulan yang sementara bisa ditarik adalah bahwa terjadi rugi daya yang cukup besar di jaringan. Kesimpulan ini diperkuat dengan data di lapangan bahwa rugi daya di jaringan cukup besar melebihi estimasi yang ditetapkan. Kerugian finansial akibat rugi daya ini merupakan hal yang tidak bisa dihindarkan. Adapun beberapa rugi-rugi daya yang ada di jaringan distribusi. Berikut adalah penjelasan mengenai rugi-rugi yang terjadi pada jaringan distribusi.

2.2.12.1 Rugi-rugi pada Jaringan Distribusi

Pemilihan jenis kabel yang akan digunakan pada jaringan distribusi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan dari suatu sistem tenaga listrik. Jenis kabel dengan nilai resistansi yang kecil akan dapat memperkecil rugi-rugi daya (Cahyo, 2008). Besarnya rugi-rugi daya pada jaringan distribusi dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_{\text{losses}1\phi} = I_p^2 \times R \times L \quad (2.23)$$

Dimana untuk mencari I_p dengan persamaan 2.24 berikut:

$$I_p = \frac{P_R}{V_{r1\phi} \times pf} \quad (2.24)$$

Keterangan :	$P_{\text{losses}1\phi}$	= rugi-rugi daya (Watt)
	P_R	= daya yang diterima perfase (Watt)
	$V_{r1\phi}$	= tegangan terima perfase (Volt)
	I_p	= arus perfase (Amper)
	R	= tahanan saluran (Ohm/Km)
	L	= panjang saluran (Km)

Pf = faktor daya

Nilai resistansi dari suatu penghantar merupakan penyebab utama rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi. Nilai resistansi dari suatu penghantar dipengaruhi oleh beberapa parameter. Berikut adalah persamaan resistansi penghantar:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.25)$$

Dimana, R = resistansi saluran (Ohm)
 ρ = resistivitas bahan penghantar (Ohm-meter)
 l = panjang saluran (meter)
 A = luas penampang (m^2)

Dari persamaan diatas terlihat terdapat tiga parameter yang mempengaruhi nilai resistansi suatu penghantar, yaitu resistivitas bahan penghantar, panjang penghantar dan luas permukaan penghantar.

2.2.12.2 Rugi-rugi Transformator

Dalam unjuk kerjanya, trafo memiliki rugi-rugi yang harus diperhatikan.

Rugi-rugi tersebut adalah (Cahyo, 2008):

1. Rugi-rugi tembaga (I^2R)

Rugi-rugi tembaga merupakan rugi-rugi yang diakibatkan oleh adanya tahanan resistif yang dimiliki oleh tembaga yang digunakan pada bagian lilitan trafo, baik pada bagian primer maupun sekunder.

2. *Eddy current* (arus eddy)

Rugi-rugi arus eddy merupakan rugi-rugi panas yang terjadi pada bagian inti trafo. Perubahan fluks menyebabkan induksi tegangan pada bagian inti besi trafo dengan cara yang sama seperti kawat yang mengelilinginya. Tegangan tersebut menyebabkan arus berputar pada bagian inti trafo. Arus eddy akan mengalir pada bagian inti trafo yang bersifat resistif. Arus eddy akan mendisipasikan energi ke dalam inti besi trafo yang kemudian akan menimbulkan panas.

3. Rugi-rugi hysteresis

Rugi-rugi hysteresis merupakan rugi-rugi yang berhubungan dengan pengaturan daerah magnetic pada bagian inti trafo. Dalam pengaturan daerah magnetic tersebut dibutuhkan energi. Akibatnya akan menimbulkan rugi-rugi terhadap daya yang melalui trafo. Rugi-rugi tersebut menimbulkan panas pada bagian inti trafo.

4. Fluks bocor

Fluks bocor merupakan fluks yang terdapat pada bagian primer maupun sekunder trafo yang lepas dari bagian inti dan kemudian bergerak melalui salah satu lilitan trafo. Fluks lepas tersebut akan menimbulkan *self-inductance* pada lilitan primer dan sekunder trafo.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya rugi-rugi daya:

- a. Besarnya arus yang mengalir
- b. Besarnya resistansi dan reaktansi pada penghantar
- c. Panjang penghantar
- d. Keseimbangan beban

- e. Jenis penghantar yang digunakan

Dampak yang diakibatkan oleh besarnya rugi-rugi daya:

- a. Terjadi panas pada trafo distribusi
- b. Terjadi panas pada mesin-mesin listrik

Cara-cara yang ditempuh untuk mengurangi besarnya rugi-rugi daya pada jaringan distribusi:

- a. Memperbaiki kualitas pemasangan konektor

Perbaikan kualitas pemasangan konektor akan berdampak memperbaiki jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi, dimana perbaikan ini akan mempengaruhi nilai resistansi. Semakin baik pemasangan konektor maka nilai resistansinya akan semakin kecil dan konduktivitas konduktor akan lebih baik dan juga akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Maka tegangan dan daya di sisi penerima akan semakin baik.

- b. Pembangunan *feeder express*

Pembangunan *feeder express* akan mengurangi arus yang mengalir pada jaringan. Hal ini akan berdampak perbaikan terhadap berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi. Berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya akan menaikkan tegangan dan daya yang diterima di sisi beban. Pembangunan *feeder express* dibangun untuk beban yang menginginkan tegangan yang konstan dan daya yang sama seperti daya yang dikirim. Pembangun *feeder express* biasanya dibangun karena pada

jaringan sebelumnya terdapat jatuh tegangan dan rugi daya yang besar yang mengakibatkan daya di sisi terima beban menjadi berkurang.

c. Pembangunan gardu baru

Pembangunan gardu baru dapat dilakukan pada sistem distribusi dengan nilai jatuh tegangan dan rugi daya yang cukup besar akibat penghantar yang terlalu panjang dan perkembangan beban yang tinggi. Pembangunan gardu baru bertujuan untuk membagi jaringan distribusi yang panjang dan beban yang banyak. Dengan membagi panjang jaringan dan beban akan mempengaruhi arus yang mengalir akan semakin kecil dan memperpendek jaringan distribusi ke beban. Hal ini akan berdampak terhadap berkurangnya rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi. Berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya akan menaikkan tegangan dan daya yang diterima di sisi beban.

d. Pemasangan kapasitor bank untuk beban bersifat induktif

Perbaikan profil tegangan dan rugi daya dapat dilakukan dengan menggunakan kapasitor bank. Umumnya beban yang terdapat pada jaringan distribusi bersifat resistif-induktif. Jadi dalam beban terdapat arus resistif dan arus induktif yang mengalir. Pemasangan kapasitor akan mengalirkan arus kapasitif. Sebagian besar arus induktif pada beban induktif akan terkompensasi oleh arus kapasitif dari kapasitor bank. Jadi pada beban induktif setelah pemasangan kapasitor bank, arus total yang mengalir akan semakin kecil atau bisa dikatakan hanya terdapat arus resistif pada jaringan. Semakin kecilnya arus yang mengalir akan berdampak terhadap perubahan

jatuh tegangan dan rugi daya. Semakin kecil arus yang mengalir pada jaringan distribusi maka jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Dengan kecilnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi maka tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan suplai daya akan semakin besar pula. Selain memperkecil arus yang mengalir memasang kapasitor bank juga dapat meningkatkan nilai faktor daya. Sebab dengan memasang kapasitor bank, akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban.

- e. Mengganti jenis penghantar dan memperbesar luas penampang penghantar
- Pengaruh kawat penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi daya adalah berkaitan terhadap nilai resistansi jaringan pada penghantar. Dimana dampak yang terjadi jika nilai resistansi jaringan semakin besar akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi semakin besar kemudian akan mengakibatkan tegangan di sisi penerima beban akan semakin kecil dan daya yang diterima akan berkurang. Oleh sebab itu untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi dilakukan dengan cara memperkecil nilai resistansi jaringan. Hal itu dapat dilakukan dengan mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan nilai konduktivitas yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah atau memperbesar ukuran kabel yang artinya akan memperbesar luas penampang dan memperkecil nilai resistansinya.

2.2.13 Perbaikan Profil Tegangan dan Mengurangi Rugi Daya

1. Perbaikan Profil Tegangan

Perbaikan profil tegangan merupakan upaya yang dilakukan untuk mengurangi jatuh tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi. Dalam penyediaan tenaga listrik, tegangan yang konstan merupakan salah satu syarat utama yang harus dipenuhi. Tegangan pada bagian-bagian jaringan distribusi memiliki nilai yang berbeda-beda dalam setiap bagiannya. Oleh karenanya perbaikan profil tegangan tidak dapat dilakukan pada satu bagian saja, melainkan harus merata pada bagian-bagian dalam sistem yang mengalami penurunan. Perbaikan profil tegangan dapat dilakukan dengan cara mengubah *load tap changer*, pemasangan kapasitor bank dan memperbesar ukuran penghantar konduktor.

2. Mengurangi Rugi-rugi Daya

Mengurangi rugi-rugi daya merupakan upaya yang dilakukan untuk memperkecil rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi. Rugi daya pada jaringan distribusi disebabkan oleh rugi-rugi teknis pada jaringan, yaitu rugi-rugi yang disebabkan besarnya nilai tahanan resistansi dan reaktansi pada jaringan. Rugi daya berbanding lurus terhadap arus, panjang jaringan dan besarnya nilai tahanan resistansi dan reaktansi pada jaringan dan berbanding terbalik terhadap luas penampang penghantar. Untuk mengurangi rugi daya dapat dilakukan dengan cara memasang kapasitor bank dan memperbesar ukuran penghantar konduktor.

Pada penjelasan diatas diketahui bahwa untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi daya terdapat dua cara yang sama yakni memasang kapasitor dan memperbesar ukuran penghantar konduktor sedangkan *load tap changer* hanya akan memperbaiki profil tegangan saja. Berikut penjelasan dari *load tap changer*, Pemasangan kapasitor bank, Memperbesar ukuran penghantar Konduktor.

2.2.13.1 *Load Tap Changer (LTC)*

Menurut Cahyo (2008), Perbaikan profil tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan metode pengaturan tegangan berupa penggunaan *load tap changer*. Dengan menggunakan *load tap changer* dapat mengatur rasio lilitan primer dan sekunder trafo. Dengan demikian kita dapat mengatur tegangan keluar trafo. Mengubah *tap changer* hanya akan mempengaruhi nilai tegangannya saja, dimana mengubah *tap changer* akan menaikkan tegangan keluaran (sekunder) dan mengakibatkan tegangan di sisi terima beban akan terjadi kenaikan pula. Dampak perbaikan profil tegangan dengan *load tap changer* hanya akan menaikkan tegangan keluaran (sekunder) dan tegangan di sisi penerima. Tetapi tidak akan merubah besarnya nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan disitribusi. Karena arus yang mengalir pada jaringan dsitribusi dan impedansi pada jaringan sama seperti keadaan sebelun dilakukannya perubahan *tap changer*. Untuk mendapatkan tegangan keluaran sekunder yang lebih baik dapat dilakukan dengan persamaan 2.26 berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2.26)$$

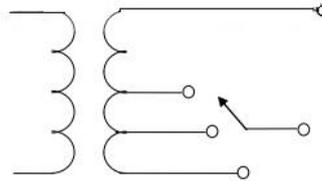
Keterangan : VP = tegangan di sisi primer
VS = tegangan di sisi sekunder
NP = jumlah lilitan primer
NS = jumlah lilitan sekunder
 a = rasio lilitan

Load tap changer dapat digunakan di gardu induk maupun gardu distribusi tergantung dari perbaikan tegangan yang diinginkan.

Proses perubahan tap trafo itu sendiri ada dua jenis, yaitu perubahan tap positif dan negative. Biasanya nilai perubahan tap trafo menggunakan ukuran persen (%) dan nilainya bervariasi antara $\pm 10\%$ sampai $\pm 15\%$ tergantung dari trafo yang digunakan. Perubahan tap positif akan meningkatkan jumlah lilitan di sisi sekunder, sedangkan tap negative sebaliknya akan mengurangi jumlah lilitan di sisi sekunder. *Load tap changer* biasanya telah memiliki ukuran tap sendiri tergantung dari pabrik yang memproduksinya. Sehingga pengaturan tegangan dengan menggunakan *load tap changer* sifatnya terbatas dan tergantung dari jenis *Load tap changer* yang digunakan. Semakin banyak level perubahan tap yang dimiliki oleh suatu trafo semakin baik pula proses pengaturan tegangan yang dapat dilakukan (Cahyo, 2008).

Load tap changer itu sendiri ada dua macam yaitu *off-load tap changing transformer* dan *under-load tap changing transformer* (ULTC). Trafo dengan ULTC dapat digunakan secara bervariasi setiap hari, setiap jam, bahkan setiap menit tergantung kondisi sistem tanpa harus menimbulkan interupsi terhadap suplai daya listrik (Cahyo, 2008).

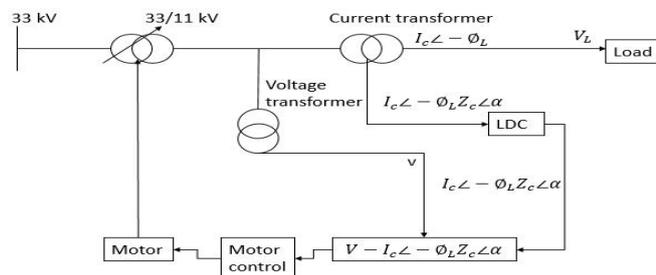
Gambar 2.20 merupakan skema *Load tap changer*, dimana *tap changer* berada pada sisi sekunder.



Gambar 2. 20 Skema *load tap changer*

(Sumber : <http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/123971-R030808.pdf>)

Tap changer itu sendiri dapat dilakukan secara manual maupun otomatis. Perubahan *tap changer* secara manual dianggap kurang efisien sebab masih membutuhkan faktor manusia yang harus mengubah posisi *tap changer* setiap terjadi penurunan nilai tegangan yang cukup signifikan. Pengaturan *tap changer* secara otomatis dilakukan dengan menggunakan pengaturan otomatis, yang akan mengubah posisi *tap changer* saat nilai tegangan keluaran trafo mengalami penurunan. Berikut adalah diagram sistem pengendali pada *on-load tap changing transformer* dengan *line drop compensation* (LDC) (Cahyo, 2008).



Gambar 2. 21 Skematik sistem pengendali *on-load-tap-changing transformer* dengan *line drop compensation* (LDC)

(Sumber : <http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/123971-R030808.pdf>)

Perubahan tegangan terdeteksi akan mengumpan balik ke pengatur tegangan otomatis yang kemudian akan memerintahkan motor listrik pengubah *tap changer* untuk memindahkan posisi *tap changer* keposisi yang sesuai agar tegangan keluaran trafo kembali konstan. Pengaturan tegangan otomatis itu sendiri harus dijaga agar tidak terlalu peka terhadap perubahan tegangan yang terjadi. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur rangkaian umpan baliknya, sehingga *tap changer* tidak sering bekerja tetapi cukup menjaga ketersediaannya tegangan yang baik (Cahyo, 2008).

Misalkan kita akan melakukan *tap changer* penurunan tegangan (*step down*), dengan mengubah-ubah ukuran tap di sisi sekunder trafo. Jika diinginkan peningkatan tegangan pada bagian sekunder trafo, maka harus dilakukan perubahan *tap changer* yang akan menambah jumlah lilitan di sisi sekunder trafo (*tap positif*). Sehingga nilai tegangan di sisi sekunder akan mengalami peningkatan. Sedangkan untuk kondisi sebaliknya dapat dilakukan dengan cara melakukan *tap changer* yang akan mengurangi jumlah lilitan di sisi sekunder trafo (*tap negative*). Dengan demikian nilai tegangan di sisi sekunder akan mengalami penurunan (Cahyo, 2008).

2.2.13.2 Pemasangan Kapasitor Bank

Kapasitor Bank digunakan secara luas pada sistem distribusi untuk perbaikan faktor daya dan pengaturan tegangan penyulang. Pada jaringan distribusi, kapasitor bank berguna untuk mengkompensasi daya reaktif sistem dan memastikan tegangan terjaga pada levelnya pada saat beban penuh (Cahyo, 2008).

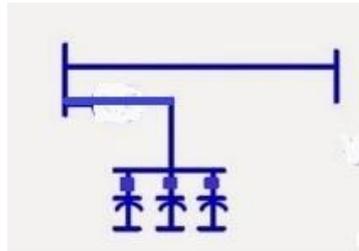
Beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif, yang kemudian akan dapat menimbulkan jatuh tegangan di sisi penerima. Dengan melakukan

pemasangan kapasitor bank, beban akan mendapatkan suplai daya reaktif. Kompensasi yang dilakukan oleh kapasitor bank, akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban. Dengan demikian jatuh tegangan yang terjadi dapat dikurangi (Cahyo, 2008).

Umumnya beban yang terdapat pada jaringan distribusi bersifat resistif-induktif. Jadi dalam beban terdapat arus resistif dan arus induktif yang mengalir. Pemasangan kapasitor akan mengalirkan arus kapasitif. Sebagian besar arus induktif pada beban induktif akan terkompensasi oleh arus kapasitif dari kapasitor bank. Jadi pada beban induktif setelah pemasangan kapasitor bank, arus total yang mengalir akan semakin kecil atau bisa dikatakan hanya terdapat arus resistif pada jaringan. Semakin kecilnya arus yang mengalir akan berdampak terhadap perbaikan profil tegangan dan rugi daya. Semakin kecil arus yang mengalir pada jaringan distribusi maka jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Dengan kecilnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi maka tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan suplai daya akan semakin besar pula. Selain memperkecil arus yang mengalir memasang kapasitor bank juga dapat meningkatkan nilai faktor daya. Sebab dengan memasang kapasitor bank akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban.

Kapasitor bank dengan switch mekanik (MSCs) dipasang di gardu utama pada area beban. Proses *switching* sering dilakukan secara manual dengan relay tegangan untuk melindungi *switch* ketika tegangan melebihi batasnya. Untuk stabilitas tegangan, kapasitor bank berguna untuk mendorong generator terdekat

beroperasi dengan faktor daya mendekati satu. Jika dibandingkan dengan SVC, kapasitor bank memiliki keuntungan yaitu biaya yang murah (Cahyo, 2008).



Gambar 2. 22 kapasitor bank terhubung dengan bus penyulang
(Sumber : <http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/123971-R030808.pdf>)

Dengan pemasangan kapasitor bank, nilai daya reaktif yang mengalir ke beban akan berkurang. Sebab beban mendapatkan suplai daya reaktif dari komponen bank kapasitor. Ukuran kapasitor untuk memperbaiki faktor daya sistem pada titik-titik tertentu dapat dihitung dengan bantuan komputer. Perhitungan secara manual dapat dilakukan untuk sistem distribusi yang relative kecil, KVAR kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari $\cos \phi_a$ sampai dengan $\cos \phi_b$ dipakai persamaan 2.27 berikut:

$$Q_c = P(\tan \phi_a - \tan \phi_b) \quad (2.27)$$

Dimana, P = daya aktif (kW)
 Q_c = kapasitas kapasitor (kVAr)
 $\tan \phi_a$ = tangen sudut faktor daya awal
 $\tan \phi_b$ = tangen sudut faktor daya yang diinginkan

2.2.13.3 Memperbesar ukuran penghantar Konduktor

Mengganti penghantar dengan ukuran yang lebih besar bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi. Untuk

menentukan jenis penghantar baik itu kawat berisolasi maupun kabel, harus ditentukan berdasarkan pertimbangan teknis yang meliputi tegangan nominalnya, konstruksi (ukuran), dan KHA (kuat hantar arusnya). Konstruksi atau luas penampang dari penghantar juga dapat ditentukan dengan melihat rapat arus nominal suatu penghantarnya. Pada dasarnya, penentuan rapat arus ini berhubungan dengan suhu maksimum penghantar yang akan ditimbulkan oleh aliran arus. Rapat arus (S) ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \frac{I}{A} \quad (2.28)$$

Keterangan: S = rapat arus (A/mm²)
 A = luas penampang kabel (mm²)
 I = arus lewat (A)

Berdasarkan konstruksi dan kuantitasnya juga akan mempengaruhi besarnya nilai resistansi dari penghantar, yang besarnya didasarkan oleh hukum Ohm dalam panas sebagai pengganti satuan listrik, yaitu:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.29)$$

Dimana, R = resistansi saluran (Ohm)
 ρ = resistivitas bahan penghantar (Ohm-meter)
 l = panjang saluran (meter)
 A = luas penampang (m²)

Dari persamaan diatas terlihat terdapat tiga parameter yang mempengaruhi nilai resistansi suatu penghantar, yaitu resistivitas bahan penghantar, panjang penghantar dan luas penampang penghantar.

Panjang dari suatu penghantar tergantung dari jarak distribusi ke pelanggan. Sehingga nilai tersebut tidak dapat diubah secara bebas. Sedangkan resistivitas bahan tergantung dari bahan penghantar yang digunakan. Parameter ini dapat diubah-ubah tergantung dari pemilihan bahan penghantar yang digunakan. Selain itu parameter yang dapat diubah-ubah secara bebas adalah luas penampang dari penghantar. Dimana semakin besar penampang dari suatu penghantar akan mengurangi nilai resistansi saluran. Akan tetapi dalam pengubahan luas penampang penghantar harus memperhatikan faktor efisiensinya.

Dengan demikian untuk mengurangi resistansi saluran pada jaringan distribusi, kita dapat mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan bahan yang nilai resistivitasnya rendah serta memperbesar luas permukaan penghantar.

1. Jenis kawat penghantar

Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada jaringan distribusi adalah :

a. Tembaga

Tembaga murni merupakan logam liat yang berwarna kemerah-merahan dan mempunyai tahanan jenis $0,0175 \Omega\text{m}$. Tembaga mempunyai daya hantar listrik yang tinggi yaitu $57\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ pada suhu 20°C . Tembaga mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi. Massa jenis tembaga murni pada 20°C adalah $8,96 \text{ g/cm}^3$, titik beku 1083°C . Kekuatan tarik tembaga tidak tinggi yaitu berkisar antara 20 hingga 40 kg/mm^2 , kekuatan tarik batang tembaga akan naik setelah batang tembaga

diperkecil penampangnya untuk dijadikan kawat berisolasi atau kabel. Koefisien suhu (α) tembaga 0,004 per $^{\circ}$ C. Terdapat 2 macam konduktivitas pada tembaga yaitu Tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%) dan Tembaga dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%)

- Kelebihan kawat tembaga

Tembaga merupakan penghantar yang baik dibandingkan aluminium dengan diameter dan luas penampang yang sama besar, tembaga mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan aluminium, tembaga mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.

- Kekurangan kawat tembaga

Harga kawat tembaga lebih mahal dibandingkan aluminium, dengan besar hambatan yang sama tembaga lebih berat dari aluminium.

b. Aluminium

Aluminium merupakan suatu logam yang sangat ringan beratnya kira-kira sepertiga dari tembaga dan mempunyai tahanan jenis 0,0285 Ω m. Aluminium mempunyai warna keperak-perakan. Aluminium mempunyai massa jenis 2,7 g/cm³, α -nya $1,4 \times 10^5$, titik leleh 658 $^{\circ}$ C dan tidak korosif. Daya hantar aluminium sebesar 35 Ω .mm²/m atau kira-kira 61,4% daya hantar tembaga. kekuatan tariknya hanya 9 kg/mm². Aluminium mempunyai konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari beberapa jenis dengan lambang sebagai berikut:

- 1) AAC, *ALL Alluminium conductor* yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari aluminium tanpa isolasi.
- 2) AAAC, *ALL Alluminium aloy konduktor* yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari campuran logam aluminium tanpa isolasi.
- 3) ACSR, *Alluminium conductor steell reinforced* yaitu kabel yang berinti aluminium dengan selubung pita baja.
- 4) ACAR, *Alluminium conductor aloy reinforced* yaitu kabel yang berinti aluminium dengan selubung campuran logam.

- Kelebihan kawat aluminium

Harga kawat aluminium lebih murah dibandingkan tembaga, berat kawat aluminium lebih ringan dengan diameter lebih besar dari tembaga, kemampuan menghantarkan listrik tidak berbeda jauh dengan tembaga jika dikompensasi dengan ukuran kawat yang lebih besar.

- Kekurangan kawat aluminium

Daya hantar listrik maupun daya hantar panas dari aluminium lebih rendah dibandingkan tembaga. Aluminium mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang lebih rendah dibandingkan tembaga dan untuk memperbesar kuat tarik kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*alluminium alloy*), aluminium tidak mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.

2. Pengaruh konduktor penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya

Pengaruh konduktor penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi daya adalah berkaitan terhadap besar atau kecilnya nilai resistansi jaringan pada

penghantar. Dimana dampak yang terjadi terhadap profil tegangan dan rugi daya yaitu jika nilai resistansi jaringan semakin kecil akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi semakin kecil. Kemudian akan mengakibatkan tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan daya yang dikirim akan bertambah begitu pula sebaliknya. Oleh sebab itu untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi dilakukan dengan cara memperkecil nilai resistansi jaringan. Adapun faktor yang mempengaruhi nilai resistansi suatu penghantar antara lain:

- Panjang penghantar

Panjang penghantar tergantung dari jarak distribusi ke pelanggan, dimana pada jaringan distribusi jarak penyaluran energi listrik ke pelanggan sangat jauh. Sehingga nilai dari panjang jaringan tidak bisa diubah-ubah secara bebas.

- Luas penampang konduktor

Luas penampang konduktor berbanding terbalik dengan nilai resistansi jaringan, dimana semakin besar penampang dari suatu jaringan penghantar maka akan mengurangi nilai resistansi jaringan. Parameter ini dapat diubah-ubah secara bebas, akan tetapi perubahan luar penampang penghantar harus memperhatikan faktor efisiennya.

- Resistivitas bahan penghantar

Resistivitas penghantar tergantung dari jenis bahan penghantar yang digunakan. Resistivitas yang paling kecil pada bahan penghantar yaitu tembaga (Cu) dibandingkan aluminium (Al). faktor yang mempengaruhi

resistivitas pada penghantar yaitu konduktivitas penghantar, dimana tembaga (Cu) mempunyai konduktivitas yang tinggi yaitu $57 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ sedangkan aluminium (Al) mempunyai konduktivitas $35 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ atau 61% dari konduktivitas tembaga. Konduktivitas ini berbanding terbalik terhadap resistivitas, dimana untuk menentukan resistivitas yang lebih kecil maka harus menggunakan jenis penghantar yang mempunyai konduktivitas yang tinggi.

- Temperatur

Suhu pada penghantar sangat mempengaruhi terhadap nilai tahanan, dimana semakin tinggi suhu pada penghantar maka akan menyebabkan kenaikan resistivitas penghantar. Hal ini diakibatkan ketika suhu meningkat ikatan atom-atom semakin meningkat akibatnya aliran elektron terhambat.

Dengan demikian untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada penghantar. Dapat mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan nilai konduktivitas yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah atau mengganti ukuran kabel yang lebih besar yang berarti akan memperbesar luas penampang dan memperkecil nilai resistansi konduktor penghantar. Adapun faktor yang lebih sering digunakan yakni faktor ekonomis, Dimana harga yang murah lebih diminati. Tembaga mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang tinggi akan tetapi mempunyai kelemahan yakni untuk besar hambatan yang sama, tembaga lebih berat dan mahal. Oleh karena itu pada saat sekarang ini telah banyak digunakan penghantar aluminium, dimana harga yang murah dan juga lebih ringan dari tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari aluminium digunakan

campuran aluminium (*aluminium alloy*). Ada beberapa jenis campuran aluminium diantaranya AAC, AAAC, ACSR, ACAR.

2.2.14 Indeks Berorientasi pada Beban serta Energi

Ada beberapa parameter indeks keandalan jaringan distribusi salah satunya yaitu indeks yang berorientasi pada beban serta energi. Berikut beberapa yang termasuk indeks yang berorientasi pada beban serta energi:

a. ENS (*energy not supply*)

ENS merupakan indeks keandalan yang menyatakan jumlah energi yang tidak disalurkan oleh sistem selama terjadi gangguan pemadaman atau banyaknya kWh yang hilang akibat adanya pemadaman. Secara sistematis ditulis sebagai berikut (Dharmawati, 2012):

$$ENS = \sum[\text{gangguan(kW)} \times \text{Durasi (h)}] \quad (2.30)$$

b. AENS (*average energy not supply*)

AENS merupakan indeks rata-rata energi yang tidak tersalurkan akibat terjadinya pemadaman. AENS dinyatakan dengan perbandingan antara jumlah energi yang hilang saat terjadi pemadaman dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Secara matematis ditulis sebagai berikut (Dharmawati, 2012):

$$\begin{aligned} AENS &= \frac{\text{jumlah energi yang tidak tersalurkan oleh sistem}}{\text{jumlah pelanggan yang dilayani}} \quad (2.31) \\ &= \frac{ENS}{\Sigma N} \end{aligned}$$

Dimana, N = jumlah pelanggan yang dilayani

2.2.15 Program Bantu ETAP 12.6.0

2.2.15.1 Definisi ETAP

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pertahanan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain : alaran daya, hubung singkat (*Short Circuit*), *starting motor*, *transient stability*, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

ETAP *Power Station* memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar *single line* diagram atau diagram satu garis. Program ini dirancang sesuai dengan tiga konsep utama:

1. *Virtual Reality* Operasi

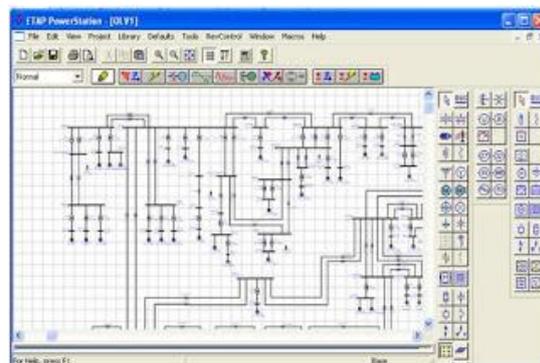
Sistem operational yang ada pada program sangat mirip dengan sistem operasi pada kondisi *real* nya. Misalnya, ketika membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, mendapatkan suatu elemen pada sistem, mengubah status operasi suatu motor, dan untuk kondisi *de-energized* pada suatu elemen dan sub-elemen sistem ditunjukkan pada gambar *single line diagram* dengan warna abu – abu.

2. Total *Integration Data*

Etap *Power Station* menggabungkan informasi sistem *electrical*, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem data base yang sama. Misalnya, untuk elemen sebuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya tetapi juga memberikan informasi melalui *raceways* yang dilewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk dalam menganalisa aliran beban (*load flow analysis*) dan analisa hubung singkat (*short-circuit analysis*) yang membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi serta perhitungan *ampacity* derating suatu kabel yang memerlukan data fisik *routing*.

3. *Simplicity in Data Entry*

Etap *Power Station* memiliki data yang *detail* untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses entri data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di masukkan sesuai dengan data-data yang ada dilapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.



Gambar 2. 23 Desain ETAP

Etap *Power Station* dapat melakukan penggambaran *single line diagram* secara grafis dan mengadakan beberapa analisa atau studi yakni *load flow* (aliran daya), *Short Circuit* (Hubung Singkat), *motor starting*, harmonisa, *transient stability*, *protective device coordination*, dan *cable derating*.

Etap *Power Station* juga menyediakan fasilitas library yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. *Library* ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP *Power Station* adalah:

1. *One Line Diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen atau peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
2. *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektrik maupun mekanis dari peralatan yang detail atau lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi atau analisa.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi system dan metode-metode yang dipakai.
4. *Study Case*, berisikan parameter-parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

2.2.15.2 Elemen – elemen AC di ETAP

1. Transformator

Transformator 2 kawat system distribusi dimasukkan dalam editor power station software transformator 2 kawat pada *power station software* ETAP ditunjukkan gambar simbol transformator 2 kawat.



Gambar 2. 24 Simbol Transformator 2 Kawat di ETAP

2. Generator

Generator sinkron sistem distribusi tenaga listrik dimasukkan dalam editor power station ETAP berupa rating kV, rating MW, dan mode kerja yang ditampilkan pada bagian atas informasi editor generator. Simbol generator sinkron pada *power station software* ETAP ditunjukkan pada gambar.



Gambar 2. 25 Simbol Generator di ETAP

3. Load

Beban listrik sistem distribusi tenaga listrik dimasukkan dalam editor *power station* ETAP berupa rating KV, rating MW, dan mode kerja yang ditampilkan pada bagian atas informasi editor generator, simbol generator sinkron pada power station software ETAP ditunjukkan pada gambar.



Gambar 2. 26 Simbol statis dan dinamis di ETAP

4. Pemutusan Rangkaian

Merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek. Simbol pemutus rangkaian di ETAP ditunjukkan pada gambar.



Gambar 2. 27 simbol pemutus rangkaian di ETAP

Bus AC atau node sistem distribusi tenaga listrik dimasukkan dalam editor *power station software* ETAP. Editor bus sangat membantu untuk permodelan berbagai tipe bus dalam system tenaga listrik. Generator, motor dan beban static adalah elemen yang dapat dihubungkan dengan beberapa bus yang diinginkan. Simbol bus pada *power station software* ETAP ditunjukkan gambar.



Gambar 2. 28 simbol bus di ETAP

2.2.15.3 Elemen-elemen di ETAP

Suatu sistem tenaga listrik terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung singkat, maka data-data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain:

- Data Generator
- Data transformator

- Data kawat penghantar
- Data bus
- Data beban

2.2.15.4 Elemen Aliran Daya

Program analisis aliran daya pada *software* ETAP dapat menghitung tegangan pada tiap-tiap cabang, aliran arus pada sistem tenaga listrik, dan aliran daya yang mengalir pada sistem tenaga listrik. Metode penghitungan aliran daya dapat dipilih untuk efisiensi perhitungan yang lebih baik. Metode perhitungan aliran daya pada *software* ETAP ada tiga, yaitu: Newton Rapson, Fast-Decouple dan Gauss Sedel seperti yang telah diuraikan sebelumnya.



Gambar 2. 29 Toolbar Load Flow di ETAP

Keterangan:

Gambar Kiri ke kanan menunjukkan *tool* dan *toolbar* aliran daya, yaitu :

- *Run Load Flow* adalah icon aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
- *Update Cable Load Current* adalah icon untuk merubah kapasitas arus pada kabel sebelum *load flow* di *running*.
- *Display Option* adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.
- *Alert* adalah icon untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.

- *Report manager* adalah icon untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk *report* yang dapat dicetak.