



BAB II

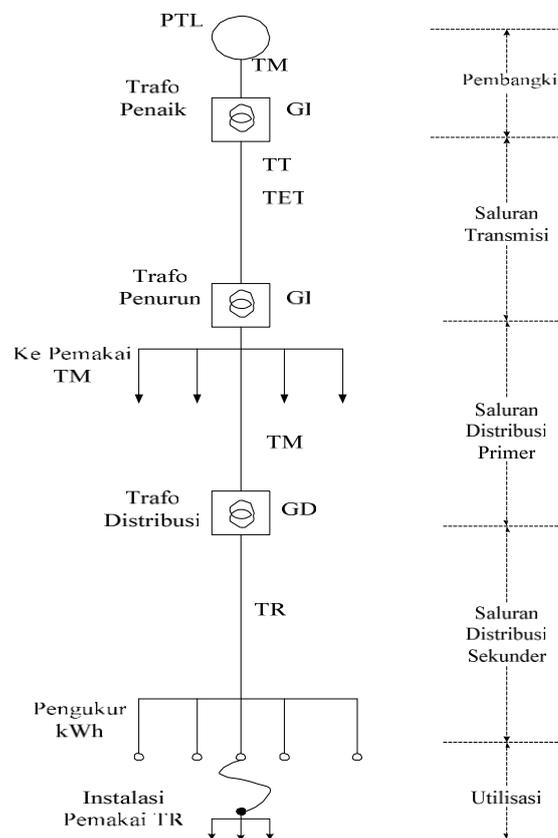
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹⁵

Pada umumnya suatu sistem tenaga listrik yang lengkap mengandung empat unsur Pertama, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM). Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT), atau tegangan extra tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). Keempat, adanya unsur pemakaian atas utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah atau tegangan tinggi. Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik (PTL) yang dapat merupakan suatu pusat listrik tenaga uap (PLTU), pusat listrik tenaga air (PLTA), pusat listrik tenaga gas (PLTG), pusat listrik tenaga diesel (PLTD), ataupun pusat listrik tenaga nuklir (PLTN). PTL biasanya membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 dan 20 KV. Pada sistem tenaga listrik yang besar, atau bilamana PTL terletak jauh dari pemakai, maka tenaga listrik itu perlu diangkut melalui saluran transmisi, dan tegangannya harus dinaikkan dari TM menjadi tegangan tinggi (TT). Pada jarak yang sangat jauh malah diperlukan tegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu dilakukan di gardu induk (GI) dengan mempergunakan transformator penaik (step-up transformer). Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang dapat merupakan suatu industri atau kota, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah (TM). Hal



ini juga dilakukan pada suatu GI dengan mempergunakan transformator penurun (step down transformer). Di Indonesia tegangan menengah adalah 20 KV. Saluran 20 KV ini menelusuri jalan-jalan di seluruh kota, dan merupakan sistem distribusi primer. Di tepi-tepi jalan, biasanya berdekatan dengan persimpangan terdapat gardu-gardu distribusi (GD). Yang mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah melalui transformator distribusi. Melalui tiang-tiang listrik yang terlihat di tepi jalan, tenaga listrik tegangan rendah disalurkan kepada konsumen. Di Indonesia, tegangan rendah adalah 220/380 volt, dan merupakan sistem distribusi sekunder.



Gambar 2.1¹ Sistem Tenaga Listrik

¹ Abdul Kadir, Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik, Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press), Jakarta, 2000. hal 5



2.2 Sistem Distribusi^[13]

Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan semua bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan sumber listrik berdaya besar (*bulk power source*) dengan rangkaian pelayanan pada konsumen, sumber daya besar tersebut dapat berupa:

1. Pusat pembangkit tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan jaringan distribusi.
2. Gardu induk, yaitu gardu yang disuplai oleh pusat pembangkit tenaga listrik melalui jaringan-jaringan transmisi dan subtransmisi.

Salah satu fungsi gardu induk adalah untuk mensuplay tenaga listrik ke konsumen yang terletak jauh dari pusat pembangkit tenaga listrik. Fungsi utama dari sistem distribusi adalah menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik ke pemakai atau konsumen. Baik buruknya suatu sistem distribusi dinilai dari bermacam-macam faktor diantaranya adalah:

1. Regulasi tegangan (*Voltage regulation*).
2. Kontinuitas pelayanan.
3. Fleksibilitas.
4. Efisiensi.
5. Harga sistem.

Jadi masalah-masalah yang dihadapi dalam suatu sistem jaringan distribusi adalah bagaimana menyalurkan tenaga listrik ke konsumen dengan cara sebaik-baiknya untuk saat tertentu dan untuk waktu yang akan datang.

Biasanya suatu sistem distribusi harus memenuhi beberapa syarat, sebagai berikut:

1. Regulasi tegangan tidak terlampau besar.
2. Gangguan terhadap pelayanan (*interruption*) tidak boleh terlalu sering.
3. Gangguan terhadap pelayanan tidak boleh terlalu lama serta daerah yang mengalami gangguan dibatasi.
4. Biaya sistem harus serendah mungkin.
5. Sedapat mungkin sistem harus fleksibel (mudah menyesuaikan diri dengan

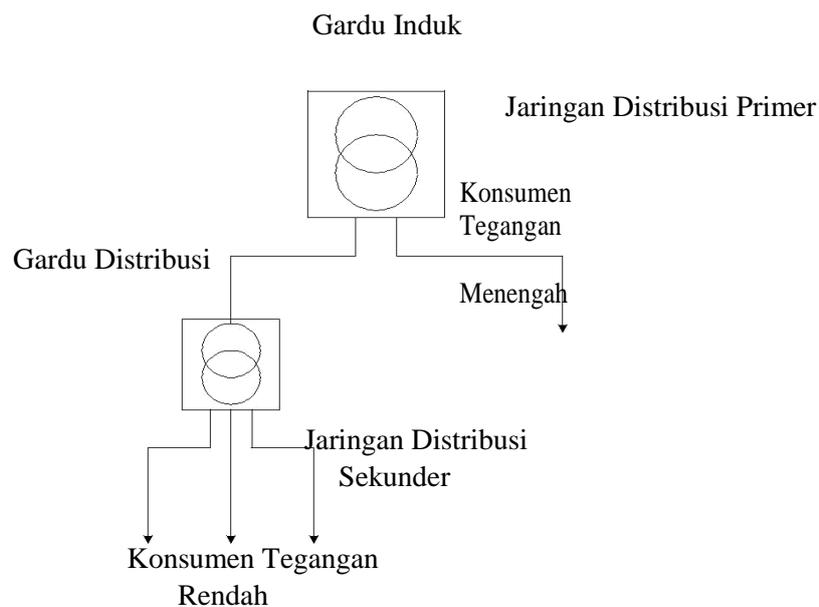


perubahan-perubahan pada sistem akibat perubahan beban yang tidak menelan biaya yang terlalu tinggi).

Untuk sistem jaringan distribusi tenaga listrik pada umumnya terdiri dari empat bagian, yaitu:

1. Gardu induk distribusi tenaga listrik.
2. Jaringan distribusi primer.
3. Gardu distribusi.
4. Jaringan distribusi sekunder.

Berikut ini akan diperlihatkan diagram skematis dari jaringan distribusi tenaga listrik tersebut.



Gambar 2.2 Diagram Skematis Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Suatu sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari:

1. Gardu induk distribusi

Gardu induk distribusi berfungsi melayani daerah beban tertentu dengan menurunkan tegangan subtransmisi menjadi tegangan distribusi. Tegangan subtransmisi biasanya 70 KV, sedangkan tegangan distribusi primernya (tegangan



menengah) 20 KV. Pada gardu induk distribusi biasanya dilengkapi dengan peralatan ukur dan peralatan pengaman untuk menjaga kelangsungan pelayanan serta melindungi peralatan lainnya.

2. Jaringan distribusi primer

Merupakan jaringan distribusi yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari gardu induk distribusi menuju gardu-gardu distribusi. Jaringan ini menggunakan tegangan menengah sebesar 20 KV.

3. Gardu distribusi

Gardu distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan yang disuplay dari jaringan listrik primer (20 KV) menjadi tegangan rendah (380 V/220 V).

4. Jaringan distribusi sekunder

Merupakan jaringan yang menghubungkan sisi tegangan rendah transformator distribusi menuju konsumen.

2.2.1 Gardu Induk Distribusi Tenaga Listrik^[1]

Gardu induk sebagai penerima daya listrik dari gardu induk transmisi dan menyalurkannya kembali ke gardu-gardu distribusi dapat dibedakan berdasarkan jenis pasangannya, menurut fungsinya dan menurut hubungan rangkaian dayanya.

1. Gardu induk menurut jenis pasangannya.

Menurut jenis pasangannya gardu induk dapat dibagi menjadi lima, yaitu:

- a. Gardu induk pasangan luar, terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasangan luar, di mana peralatannya dipasang diudara terbuka. Jenis ini memerlukan tempat yang luas namun biaya konstruksinya relatif murah dan pendinginannya mudah. Karena itu gardu induk jenis ini biasanya dipakai dipinggiran kota di mana harga tanah murah.
- b. Gardu induk pasangan dalam, di mana peralatan-peralatannya ditempatkan di dalam suatu ruangan tertutup. Jenis pasangan dalam dipasang di dalam kota, di mana harga tanah mahal. Di samping itu jenis ini mungkin di pakai



untuk menjaga keselaran dengan lingkungan sekitarnya, juga untuk menghindari kebakaran dan gangguan suara.

- c. Gardu induk setengah pasangan luar (*semi-outdoor substation*), sebagian peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung. Gardu induk ini disebut juga gardu induk setengah pasangan dalam. Untuk gardu induk jenis ini dipakai bermacam-macam corak dengan pertimbangan-pertimbangan ekonomis, pencegahan kontaminasi garam, pencegahan gangguan suara, pencegahan gangguan suara dan sebagainya.
- d. Gardu induk pasangan bawah tanah, hampir semua peralatan terpasang dalam bangunan bawah tanah. Alat pendinginnya biasanya terletak di atas tanah. Dipusat kota dimana tanah sukar didapat, jenis pasangan bawah tanah ini dapat di pakai, misalnya dibagian kota yang sangat ramai, di jalan-jalan pertokoan dan di jalan-jalan dengan gedung bertingkat. Kebanyakan gardu induk ini dibangun di bawah jalan raya

2. Gardu induk menurut fungsinya

Menurut fungsinya, gardu induk dapat dikategorikan dalam tiga jenis, yaitu:

- a. Gardu induk Switching, berfungsi menurunkan tegangan dari dua atau lebih saluran transmisi untuk memparalelkan dua atau lebih pusat pembangkit.
- b. Gardu induk distribusi, berfungsi menurunkan tegangan saluran transmisi atau subtransmisi ke tegangan distribusi.
- c. Gardu induk keperluan khusus, digunakan untuk keperluan-keperluan khusus misalnya pengaturan tegangan, pengubahan arus dari bolak-balik ke arus searah (AC ke DC) atau sebaliknya, pengubahan frekuensi dan lain sebagainya.



2.2.2 Jaringan Distribusi Primer^[13]

Jaringan distribusi primer adalah bagian dari sistem distribusi yang menghubungkan gardu induk ke beberapa gardu hubung atau gardu distribusi pada suatu tegangan primer. Dalam perkembangan beban yang meningkat pesat dari waktu ke waktu mengurangi rugi - rugi tegangan serta rugi-rugi daya sekecil mungkin, maka sekarang umumnya tidak semua bagian sistem distribusi seperti yang disebut diatas dipergunakan dan tegangan yang dipakai semakin tinggi.

Dengan demikian beberapa pengertian mengenai bagian dari sistem juga berubah, jaringan antar gardu induk dan gardu distribusi yang dahulu disebut sebagai jaringan subtransmisi sekarang disebut jaringan distribusi primer, sedangkan jaringan distribusi sekunder adalah jaringan antara gardu distribusi dan jaringan pelayanan tegangan rendah yang langsung berhubungan dengan konsumen.

Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari :

1. Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
2. Pemutus tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya.
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya.
4. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
5. Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

2.2.2.1 Jaringan Distribusi Primer Menurut Bahan Konduktornya^[4]

Jaringan distribusi SUTM 20 KV pada umumnya menggunakan jenis kawat yaitu saluran yang konduktornya tidak dilapisi isolasi sebagai pelindung luar (telanjang). Tipe demikian digunakan pada pasangan luar yang diharapkan terbebas dari sentuhan misalnya untuk jenis kabel yaitu saluran yang konduktornya dilindungi/dibungkus lapisan isolasi.



Bahan konduktor yang paling populer digunakan adalah tembaga (*copper*) dan aluminium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Oleh karena itu ada beberapa macam jenis konduktor, yaitu:

- a. AAC (*All-Aluminium Konduktor*)
Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- b. AAAC (*All-Aluminium-Alloy Konduktor*)
Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium.
- c. ACSR (*All Konduktor, Steel-Reinforce*)
Kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- d. ACAR (*Aluminium Konduktor, Alloy- Reinforced*)
Kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

2.2.2.2 Jaringan Distribusi Berdasarkan Sistem Penyaluran^[14]

A. Jaringan Hantaran Udara (*Over Head Line*).

Jaringan udara dapat berupa kawat terbuka atau kabel udara. Jaringan ini direncanakan untuk kawasan dengan kepadatan beban yang rendah atau sangat rendah. Jaringan hantaran udara ini salah satunya menggunakan penghantar AAAC dan Kabel AAACS. Adapun beberapa keuntungan dan kerugian penggunaan jaringan ini, antara lain adalah:

Keuntungannya:

1. Lebih fleksibel dan leluasa dalam upaya untuk perluasan beban.
2. Dapat digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada tegangan di Atas 66 KV.
3. Harga material relatif lebih rendah dari jaringan bawah tanah.



4. Lebih mudah dalam pemasangannya.
5. Bila terjadi gangguan hubung singkat, mudah diatasi dan dideteksi.

Kerugiannya:

1. Mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb.
2. Untuk wilayah yang penuh dengan bangunan yang tinggi, sukar untuk menempatkan saluran.
3. Masalah efek kulit, induktansi, dan kapasitansi yang terjadi, akan mengakibatkan tegangan drop lebih tinggi.
4. Ongkos pemeliharaan lebih mahal, karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

Jaringan udara memiliki gardu-gardu tiang berkapasitas kecil dan semua peralatannya berupa jenis pasangan luar (*outdoor type*). Kemampuan penyalurannya relatif lebih kecil dibanding jaringan bawah tanah dan dari sistem kehandalan, jaringan ini lebih rendah dari jaringan bawah tanah. Hantaran udara, terutama hantaran udara

telanjang digunakan pada pemasangan di luar bangunan, diregangkan pada isolator di antara tiang-tiang yang disediakan secara khusus.

B. Jaringan Hantaran Bawah Tanah (*Underground Cable*).

Jaringan bawah tanah direncanakan untuk kawasan padat beban tinggi seperti di pusat kota, pusat industri, yang mengutamakan kehandalan dan estetika pada tata tempat dan lokasi, pemasangan hantaran jaringan di bawah tanah lebih baik jika dibandingkan dengan pemasangan hantaran jaringan udara. Pada jaringan ini jenis penghantar yang digunakan adalah kabel tanah (Kabel NYFGBY). Jaringan ini lebih handal dibandingkan dengan hantaran jaringan udara di karenakan sistem pengaman yang dimiliki lebih banyak di bandingkan penghantar telanjang. Gardunya merupakan gardu beban berkapasitas besar dan peralatan-peralatannya



berupa pasangan dalam (*indoor type*). Adapun keuntungan dan kerugian jaringan ini adalah:

Keuntungannya:

1. Tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb.
2. Tidak mengganggu pandangan, bila adanya bangunan yang tinggi.
3. Dari segi keindahan, saluran bawah tanah lebih sempurna dan lebih indah dipandang.
4. Mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara.
5. Ongkos pemeliharaan lebih murah, karena tidak perlu adanya pengecatan.
6. Tegangan drop lebih rendah karena masalah induktansi bisa diabaikan.

Kerugiannya:

1. Biaya investasi pembangunan lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara.
 2. Saat terjadi gangguan hubung singkat, usaha pencarian titik gangguan tidak mudah (susah).
 3. Perlu pertimbangan-pertimbangan teknis yang lebih mendalam di dalam perencanaan, khususnya untuk kondisi tanah yang dilalui.
 4. Hanya tidak dapat menghindari bila terjadi bencana banjir, desakan akar pohon, dan ketidakstabilan tanah.

2.2.3 Struktur Jaringan Distribusi^[14]

Bentuk jaringan distribusi mempunyai beberapa macam konfigurasi/ struktur, diantaranya adalah:

1. Struktur jaringan radial.
2. Struktur jaringan loop/ring.
3. Struktur jaringan grid/network.
4. Struktur jaringan spindle.



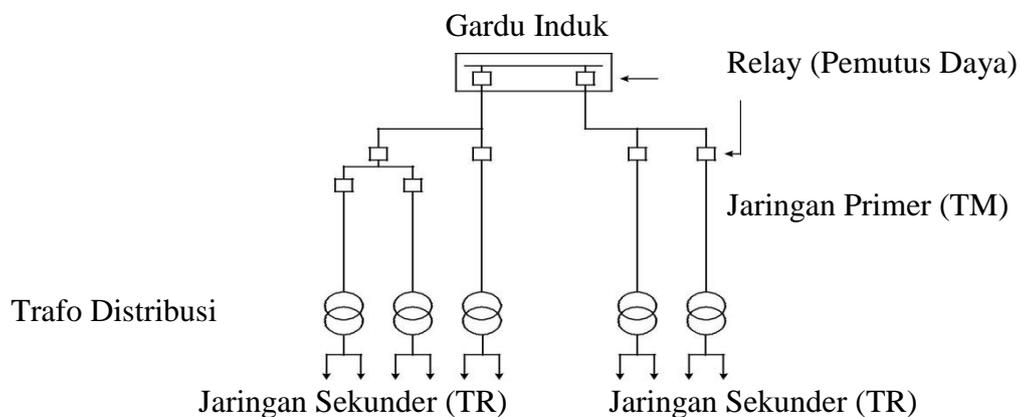
2.2.3.1 Struktur Jaringan Radial

Struktur jaringan radial merupakan bentuk jaringan yang paling banyak dan umum dipakai, terdiri atas fider (*feeders*) atau rangkaian tersendiri, yang seolah-olah keluar dari suatu sumber atau wilayah tertentu secara radial. Fider itu dapat juga dianggap sebagai terdiri atas suatu bagian utama dimana saluran samping atau lateral lain bersumber dan dihubungkan dengan transformator distribusi.

Struktur jaringan radial banyak dipakai terutama pada daerah dengan tingkat kerapatan bebannya rendah. Struktur jaringan ini mempunyai satu jalur daya ke beban, maka semua beban pada saluran itu akan kehilangan daya. Pada industri-industri, terutama industri yang besar banyak menggunakan struktur jaringan radial.

Keuntungan utama dari sistem radial ini adalah bentuk sederhana dan biaya pertamanya rendah. Salah satu kelemahan sistem ini adalah kontinuitas pelayanannya kurang baik dan keandalannya rendah serta jatuh tegangan yang terjadi besar, terutama pada beban yang terdapat pada ujung saluran. Kerapatan arus yang besar pada jaringan tipe radial

ini terdapat pada saluran antara sumber daya dan gardu distribusi berikutnya dan yang terkecil pada bagian ujung saluran. Sesuai dengan tingkat kerapatan arusnya, maka besar penampang penghantar tersebut dapat berbeda-beda.



Gambar 2.3 Struktur Jaringan Radial



Adapun keuntungan dan kerugian dari jaringan tipe ini adalah sebagai berikut:

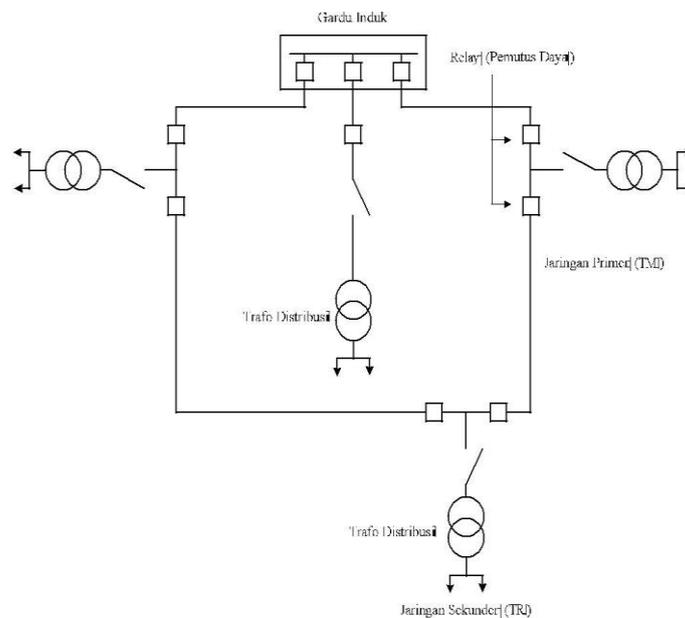
Keuntungannya:

1. Konstruksinya lebih sederhana.
2. Material yang digunakan lebih sedikit, sehingga lebih murah.
3. Sistem pemeliharaannya lebih murah.

Untuk penyaluran jarak pendek akan lebih murah Kelemahannya:

1. Keterandalan sistem ini lebih rendah.
2. Faktor penggunaan konduktor 100 %.
3. Makin panjang jaringan (dari Gardu Induk atau Gardu Hubung).
4. kondisi tegangan tidak dapat diandalkan.
5. Rugi-rugi tegangan lebih besar.
6. Kapasitas pelayanan terbatas.
7. Bila terjadi gangguan penyaluran daya terhenti.

2.2.3.2 Struktur Jaringan Loop/Ring

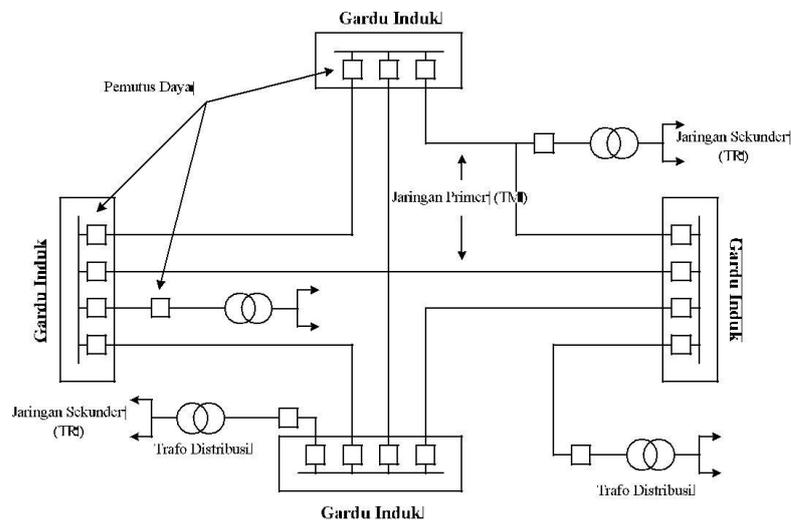


Gambar 2.4 Struktur Jaringan Loop/Ring



Struktur jaringan primer loop/ring ini biasanya digunakan untuk melayani beban yang membutuhkan kontinuitas pelayanan yang lebih baik, seperti pabrik-pabrik dan bangunan-bangunan komersial yang mempunyai beban sedang dan besar. Pada prinsipnya struktur jaringan primer loop ini adalah jaringan yang dimulai dari satu titik sumber rel daya keliling ke daerah beban, kemudian kembali ke titik beban atau rel daya semula.

2.2.3.3 Struktur Jaringan Grid/Network



Gambar 2.5 Struktur Jaringan Grid/Network

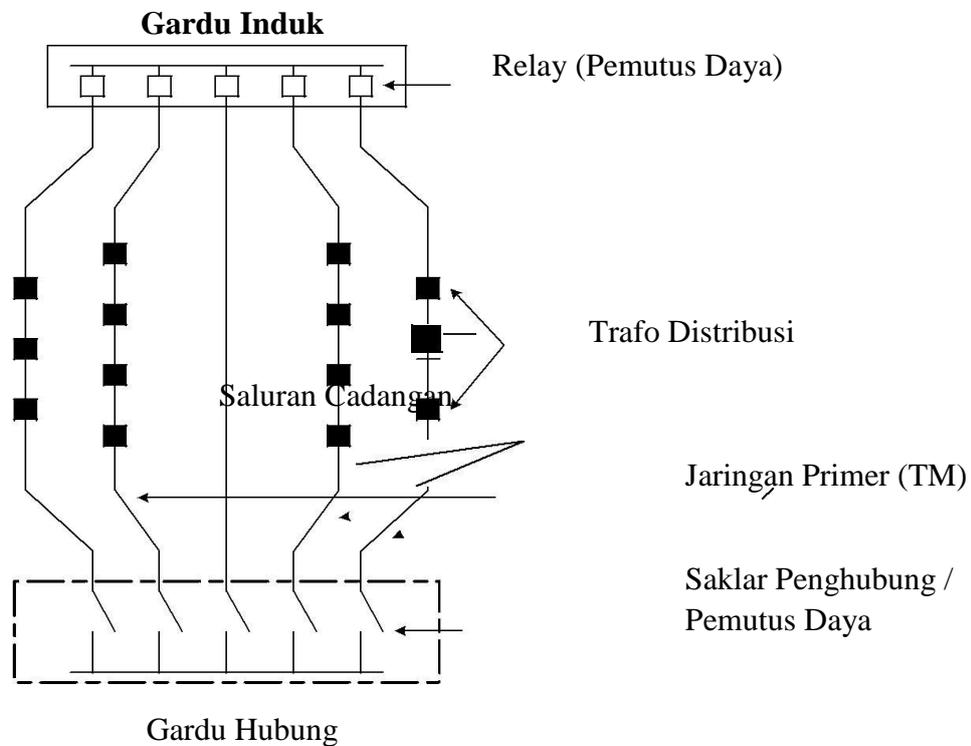
Struktur jaringan grid/network ini terjadi bila ada beberapa gardu induk atau sumber daya yang saling berinterkoneksi sehingga setiap titik beban mempunyai beberapa kemungkinan menerima daya dari berbagai arah. Sistem jaringan ini mempunyai kualitas cukup baik bila dibandingkan dengan bentuk jaringan sistem radial ataupun bentuk loop/ ring. Sistem bentuk ini mempunyai beban dengan kerapatan yang cukup tinggi serta memerlukan pelayanan terus-menerus, tetapi kelemahan sistem ini pada biaya investasi yang cukup tinggi. Pada sistem bentuk ini jika salah satu feeder mendapat gangguan maka konsumen masih bias disuplai



melalui feeder lainnya, disamping itu pada sistem ini digunakan *primary network* urut sebagai pengamannya yang terdiri dari :

1. Pemutus rangkaian utama (*Main Circuit Breaker*).
2. Pengaman jaringan (*Network Protection*).
3. Pemutus cabang (*Breaker Feeder*).
4. Perlengkapan lainnya.

2.2.3.4 Struktur Jaringan Spindle



Gambar 2.6 Struktur Jaringan Spindle

Struktur jaringan bentuk spindle ini adalah hasil perkembangan jaringan bentuk loop dipisah dan dengan cara menambahkan sebuah saluran cadangan serta gardu refleksi. Adapun tujuan daripada modifikasi sistem jaringan distribusi adalah untuk mendapatkan efisiensi sistem yang handal. Pada sistem ini saluran dari sumber yang ke gardu induk, diteruskan ke gardu refleksi atau disebut juga gardu hubung. Juga ada saluran bebas atau saluran langsung menuju gardu hubung.



Beban-beban dihubungkan dengan beban, saluran ini merupakan saluran pengisi cadangan yang akan berfungsi apabila saluran pengisi utama mengalami gangguan. Pada keadaan operasi normal semua pemutus daya di gardu hubung adalah posisi terbuka, dengan tujuan bila terjadi gangguan pada saluran utama dan setelah diisolir maka beban yang lain pada saluran pengisi utama tersebut dapat dilayani melalui saluran cadangan dengan menutup pemutus daya di gardu hubung untuk saluran yang bersangkutan sehingga beban-beban tersebut hanya mengalami pemutusan sebentar. Pada prinsipnya struktur jaringan sistem spindle ini merupakan perkembangan dari jaringan loop terpisah.

2.3 Sistem Pembebanan pada jaringan

Pada jaringan distribusi tegangan menengah, sistem pembebanan yang dimaksudkan adalah semua beban yang terdapat pada penyulang mulai dari beban yang disebabkan panjang dan luas penampang penghantar, serta pembebanan konsumen yang terdapat pada transformator distribusi. Dalam hal ini kita melakukan perhitungan terhadap susut daya dan tegangan yang disebabkan oleh kedua jenis beban tersebut.

Pada sistem jaringan distribusi, susut daya terjadi pada saluran penghantar dan pada transformator. Susut saluran disebabkan karena adanya resistansi dari saluran itu sendiri, sedangkan susut transformator disebabkan oleh resistansi dari belitan transformator dan susut inti.

Susut pada jaringan ini tergantung pada kondisi beban yang selalu berubah, sehingga untuk perhitungannya perlu dilakukan pada setiap kondisi beban. Khusus dalam laporan ini dibahas perhitungan efisiensi yang dilakukan berdasarkan perbandingan daya yang tersalurkan dan daya yang terpakai atau terbayarkan ke PT.PLN dengan terlebih dahulu mencari susut daya dan tegangan yang terdapat pada penyulang Tarakan yang diakibatkan oleh sistem pembebanan yang terdapat pada penyulang tersebut.



2.3.1 Parameter Saluran Distribusi

Seluruh saluran yang menggunakan penghantar dari suatu sistem tenaga listrik memiliki sifat-sifat listrik sebagai parameter saluran seperti resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi. Oleh karena saluran distribusi memiliki saluran yang tidak begitu jauh (kurang dari 80 km) dan menggunakan tegangan tidak lebih besar dari 69 kV maka kapasitansi dan konduktansi sangat kecil dan dapat diabaikan.

Resistansi yang timbul pada saluran dihasilkan dari jenis penghantar yang memiliki tahanan jenis dan besar resistansi pada penghantar tergantung dari jenis material, luas penampang dan panjang saluran. Resistansi penghantar sangat penting dalam evaluasi efisiensi distribusi dan studi ekonomis.

Induktansi timbul dari efek medan magnet di sekitar penghantar jika pada penghantar terdapat arus yang mengalir. Parameter ini penting untuk pengembangan model saluran distribusi yang digunakan dalam analisis sistem tenaga.

2.4 Defenisi Dan Teori Dasar Keandalan

Didalam pengoperasian jaringan distribusi selalu diinginkan tercapainya hal-hal sebagai berikut :

1. Cara penanganan gangguan secepat mungkin
2. Keandalan cukup baik dalam arti :
 - a) Kontinuitas cukup baik
 - b) Bila terjadi gangguan, daerah yang mengalami pemadaman sesedikit mungkin
 - c) Tegangan sumber cukup baik
 - d) Losses tidak terlalu besar

Tetapi untuk mencapai semuanya itu tergantung dari sistem dan tipe peralatan pengamanan yang diterapkan.



Sistem pengaman bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya yang disebabkan karena adanya gangguan serta meningkatkan kontinuitas pelayanan pada konsumendan menjaga keselamatan umum.

Keandalan merupakan probabilitas suatu alat (device) untuk dapat berfungsi sesuai dengan fungsi yang diinginkan selama jangka waktu yang ditetapkan. Analisa bentuk Kegagalan merupakan suatu analisa bagian dari sistem atau peralatan yang dapat gagal, bentuk kegagalan yang mungkin, efek masing-masing, bentuk kegagalan dari sistem yang kompleks. Keandalan menyatakan kemungkinan bekerjanya suatu peralatan atau sistem sesuai dengan fungsinya untuk suatu selang waktu tertentu dan kondisi tertentu. Dengan demikian keandalan dapat digunakan untuk membandingkan suatu peralatan atau sistim dengan peralatan atau sistem yang lain. Evaluasi keandalan ada dua macam, yaitu penilaian secara qualitative dan secara quantitative.

Sistem merupakan sekumpulan komponen-komponen sistem yang disusun menurut pola tertentu. Keandalan dari suatu sistem distribusi ditentukan oleh keandalan dari kompoen-komponen yang membentuk suatu sistem tersebut dan komponen itu sendiri.

Keandalan merupakan probabilitas suatu alat (device) untuk dapat berfungsi sesuai dengan fungsi yang diinginkan selama jangka waktu yang ditetapkan. Definisi keandalan mengandung empat istilah penting yaitu :

- a. Fungsi
- b. Lingkungan (kondisi operasi)
- c. Waktu
- d. Probabilitas

a. Fungsi

Keandalan suatu komponen perlu dilihat apakah suatu komponen dapat melakukan fungsinya secara baik pada jangka waktu tertentu. Kegagalan fungsi dari komponen dapat disebabkan oleh perawatan yang tak terencana (unplanned



maintenance). Fungsi atau kinerja dari suatu komponen terhadap suatu sistem mempunyai tingkatan yang berbeda- beda.

b. Lingkungan

Keandalan setiap peralatan sangat bergantung pada kondisi operasi lingkungan. Secara umum lingkungan tersebut menyangkut pemakaian, transportasi, penyimpanan, instalasi, pemakai, ketersediaan, alat-alat perawatan, debu, kimia, dan polutan lain.

c. Waktu

Keandalan menurun sesuai dengan penambahan waktu. Waktu operasi meningkat sehingga probabilitas gagal lebih tinggi. Waktu operasi ini diukur tidak hanya dalam unit waktu tetapi bisa dalam jarak operasi.

d. Probabilitas

Keandalan diukur sebagai probabilitas. Sehingga probabilitas yang berubah terhadap waktu dan masuk dalam bidang statistic dan analisa statistic.

2.4.1 Konsep Dasar Keandalan

Dalam membicarakan keandalan, terlebih dahulu harus diketahui kesalahan atau gangguan yang menyebabkan kegagalan peralatan untuk bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan. Adapun konsep keandalan meliputi :

a. Kegagalan

Kegagalan adalah berakhirnya kemampuan suatu peralatan untuk melaksanakan suatu fungsi yang diperlukan.

b. Penyebab Kegagalan

Keadaan lingkungan selama disain, pembuatan atau yang akan menuntun kepada kegagalan.

c. Mode Kegagalan

Akibat yang diamati untuk mengetahui kegagalan, misalnya suatu keadaan rangkaian terbuka atau hubung singkat.

d. Mekanisme Kegagalan



Proses fisik, kimia atau proses lain yang menghasilkan kegagalan. Kata kegagalan adalah istilah dasar yang menunjukkan berakhirnya untuk kerja yang diperlukan. Hal ini berlaku untuk peralatan bagian-bagiannya dalam segala keadaan lingkungan.

Besaran yang dapat digunakan untuk menentukan nilai keandalan suatu peralatan listrik adalah besarnya suatu laju kegagalan/kecepatan kegagalan (failure rate) yang dinyatakan dengan simbol λ .

2.4.2 Laju Kegagalan

Laju kegagalan adalah nilai rata-rata dari jumlah kesalahan persatuan waktu pada selang waktu pengamatan waktu tertentu (T), dan dinyatakan dalam satuan kegagalan pertahun.

Pada suatu pengamatan, nilai laju kegagalan dinyatakan sebagai berikut :

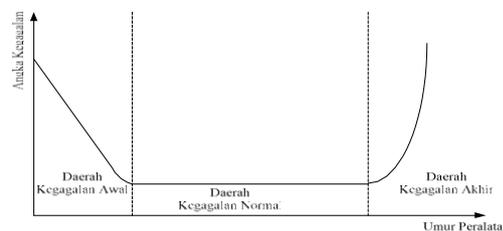
$$\lambda = \frac{d}{T} \dots \dots \dots (1)$$

λ = Laju kegagalan (kegagalan/tahun)

d = banyaknya kegagalan yang terjadi pada waktu T

T = selang waktu pengamatan (tahun)

Nilai laju kegagalan akan berubah sesuai dengan umur dari sistem atau peralatan listrik selama beroperasi. Grafik antara laju kegagalan dengan laju kegagalan dengan unsur suatu sistem atau peralatan listrik secara ideal dapat dilihat pada gambar 2.4.2



Gambar 2.7 Kurva Laju Kegagalan terhadap waktu

³ SLI 118-1988, “Daftar Istilah dan Definisi Keandalan serta Petunjuk Matematis untuk Istilah dan Definisi Keandalan, Jakarta, 1989, hal 3



Dari gambar diatas terdapat tiga macam daerah kegagalan, seperti berikut ini :

a. Daerah kegagalan awal

Periode ini mulai pada waktu yang ditentukan sebelumnya dimana angka kegagalan berkurang secara cepat dibandingkan periode berikutnya. Pada daerah kegagalan awal ini, kegagalan dapat disebabkan oleh karena kesalahan pada perencanaan dan pemasangan peralatan listrik. Nilai laju kegagalan pada daerah ini sangat besar dan akan semakin mengecil dengan bertambahnya waktu.

b. Daerah kegagalan normal

Periode dimana kegagalan terjadi pada angka kecepatan yang hampir sama yang mendekati uniform. Pada daerah kegagalan normal ini, laju kegagalan dapat dianggap konstan. Hal ini disebabkan oleh karena sistem suatu peralatan listrik sudah beroperasi dengan stabil sehingga kemungkinan terjadinya kegagalan pada setiap waktu adalah sama. Pada pembahasan selanjutnya, laju kegagalan yang akan digunakan adalah laju kegagalan normal ini saja. Karena sistem atau peralatan listrik bekerja pada daerah ini.

c. Daerah kegagalan akhir

Periode dimana kegagalan terjadi pada angka kegagalan bertambah secara cepat dibanding dengan periode sebelumnya. Pada daerah kegagalan akhir ini, laju kegagalan semakin besar dengan bertambahnya waktu. Hal ini disebabkan oleh karena dengan semakin tuanya peralatan listrik, maka kegagalan yang terjadi akan semakin banyak.

3.2 Sectionalizer (SSO)

Sectionalizer sebagai alat pemutus rangkaian untuk dapat memisah-misahkan jaringan utama dalam beberapa seksi secara otomatis, sehingga bila terjadi gangguan permanen maka luas daerah (jaringan) yang mengalami

⁴ Roy Billinton, Power System Reliability Evaluation. New York : Gordon and Breach. 1970



Pemadaman akibat gangguan permanen dapat dibatasi sekecil mungkin. Sectionalizer yang diterapkan pada jaringan distribusi 20 KV di Jawa Timur adalah tipe AVS (Automatic Vacuum Switch). AVS ini membuka pada saat rangkaian tidak bertegangan, tetapi bila dalam keadaan bertegangan harus mampu menutup rangkaian dalam keadaan hubung singkat. Peralatan ini dapat juga digunakan untuk membuka rangkaian dalam keadaan berbeban dan bekerja atas dasar penginderaan tegangan, adapun prinsip kerjanya adalah sebagai berikut :

- a. AVS akan menutup bila rangkaian kontrol dimasuki tegangan.
- b. AVS akan terbuka bila rangkain kontrol kehilangan tegangan.
- c. AVS akan terbuka dan tak menutup lagi (lock) apabila tegangan ke rangkaian

Kontrol masuk lalu hilang lagi sebelum suatu waktu tertentu. Jenis kontrolnya ada tiga macam yaitu :

- a. Kontrol untuk radial 1 (satu) sumber daya.
- b. Kontrol untuk radial 2 (dua) sumber daya dengan tipe Normally Closed
- c. Kontrol untuk radial 2 (dua) sumber daya dengan tipe Normally Open.

2.4.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Keandalan

Pada suatu sistem distribusi tenaga listrik, tingkat keandalan adalah hal yang sangat penting dalam menentukan kinerja sistem tersebut. Hal ini dapat dilihat dari sejauh mana supply tenaga listrik dilaksanakan secara kontinyu dalam satu tahun ke konsumen. Tingkat pertumbuhan beban listrik di Surabaya dan sekitarnya adalah yang tertinggi di Jawa Timur yang ditandai dengan tumbuhnya daerah kawasan yaitu : industri, bisnis dan pemukiman berakibat makin tingginya permintaan supply tenaga listrik yang kontinyu dan handal.



Beberapa definisi ini diberikan untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi indeks keandalan dalam suatu sistem distribusi sesuai standart IEEE P1366 antara lain :

Pemadaman/Interruption of Supply. Terhentinya pelayanan pada satu atau lebih konsumen, akibat dari salah satu atau lebih komponen mendapat gangguan.

Keluar/Outage. Keadaan dimana suatu komponen tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya, diakibatkan karena beberapa peristiwa yang berhubungan dengan komponen tersebut. Suatu outage dapat atau tidak dapat menyebabkan pemadaman, hal ini masih tergantung pada konfigurasi sistem. Lama keluar/Outage Duration. Periode dari saat permulaan komponen mengalami outage sampai saat dapat dioperasikan kembali sesuai dengan fungsinya.

Lama pemadaman/interruption Duration. Waktu dari saat permulaan terjadinya pemadaman sampai saat menyala kembali. Jumlah total konsumen terlayani/Total Number of Costumer Served. Jumlah total konsumen yang terlayani sesuai dengan periode laporan terakhir. Periode laporan. Periode laporan diasumsikan sebagai satu tahun.

2.4.4 Definisi Indeks Keandalan Sistem Distribusi 20 KV

Keandalan merupakan kemungkinan kelangsungan pelayanan beban dengan kualitas pelayanan listrik yang baik untuk suatu priode tertentu dengan kondisi operasi yang sesuai. Dan keandalan merupakan salah satu syarat yang tidak boleh diabaikan dalam sistem tenaga listrik. Keandalan sistem tenaga listrik sangat tergantung pada keandalan peralatan pendukung sistem, proses alamiah dari peralatan serta kesalahan dalam mengoperasikan peralatan tersebut. Ada beberapa definisi kegagalan yang sering dipakai adalah :

- Bila kehilangan daya sama sekali selama $t > 1$ cycle
- Bila kehilangan daya sama sekali selama $t > 10$ cycle
- Bila kehilangan daya sama sekali selama $t > 5$ detik



- Bila kehilangan daya sama sekali selama $t > 2$ menit

Pemilihan kriteria kegagalan tersebut sangat tergantung pada macam beban pada titik perhatian kita, yaitu sesuai dengan waktu maksimum pemadaman yang tidak mengganggu kerja beban. Indeks keandalan suatu sistem distribusi digunakan untuk mengukur tingkat keandalan dari tiap-tiap titik beban/load point. Yang merupakan indeks-indeks keandalan dasar antara lain :

λ = frekuensi kegagalan tahunan rata-rata (fault/year)

r = lama terputusnya pasokan listrik rata-rata (hours/fault)

U = lama/durasi terputusnya pasokan listrik tahunan rata-rata (hours/year).

Berdasarkan indeks-indeks keandalan dasar ini, didapat sejumlah indeks keandalan untuk sistem secara keseluruhan yang dapat dievaluasi dan bisa didapatkan lengkap mengenai kinerja sistem. Indeks-indeks ini adalah frekwensi atau lama pemadaman rata-rata tahunan. Indeks keandalan yang sering dipakai pada sistem distribusi antara lain :

2.4.5 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)

SAIFI (system average interruption frequency index) adalah indeks frekuensi gangguan sistem rata-rata tiap tahun. Menginformasikan tentang frekuensi gangguan permanen rata-rata tiap konsumen dalam suatu area yang dievaluasi. Definisinya adalah :

$$SAIFI = \frac{\text{Jumlah Total Banyaknya Gangguan Pada Konsumen}}{\text{Jumlah Pada Konsumen yang terlayani}}$$

2.4.6 SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

SAIDI (system average interruption durasi index) adalah indeks durasi gangguan sistem rata-rata tiap tahun. Menginformasikan tentang



frekuensi gangguan permanen rata-rata tiap konsumen dalam suatu area yang dievaluasi. Definisinya adalah :

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{Jumlah Total Durasi Gangguan Pada Konsumen}}{\text{Jumlah Pada Konsumen yang terlayani}}$$

2.4.7 CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)

CAIDI (Customer average interruption durasi index) adalah indeks durasi gangguan konsumen rata-rata tiap tahun, menginformasikan tentang waktu rata-rata untuk penormalan kembali gangguan tiap-tiap konsumen dalam satu tahun. Definisinya adalah :

$$\text{CAIDI} = \frac{\text{Jumlah Total Banyaknya Gangguan Pada Konsumen}}{\text{Jumlah total Konsumen yang terganggu}}$$

Indeks keandalan yang dihitung adalah indeks –indeks titik beban (load point) dan indeks-indeks sistem secara keseluruhan. Indeks load point antara lain :

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)

Persamaannya adalah :

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{NLP} \times \lambda_{\text{LP}}}{\text{N}} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

NLP = jumlah konsumen pada titik beban (load point)

N = jumlah konsumen pada penyulang

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

Persamaannya adalah :

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{NLP} \times U_{\text{LP}}}{\text{N}} \dots\dots\dots (3)$$



- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)

Persamaannya adalah :

$$CAIDI = \frac{SAIFI}{SAIDI} \dots\dots\dots (4)$$

- Indeks Relatif CAIDI

Indeks relatif CAIDI membantu untuk mengidentifikasi titik beban (load point) yang memerlukan peningkatan keandalan). Indeks relatif CAIDI mempunyai persamaan :

$$CAIDI \text{ Relatif } LP = \frac{CAIDI_{fed}}{CAIDI_{LP}} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana :

$CAIDI_{fed}$ = CAIDI rata-rata pada penyulang

$CAIDI_{LP}$ = CAIDI pada load point

Kemudian :

- Jika indeks relatif CAIDI =1, maka konsumen pada load point mempunyai nilai keandalan rata-rata
- Jika indeks relatif CAIDI <1, maka konsumen pada load point mempunyai nilai keandalan dibawah rata-rata
- Jika indeks relatif CAIDI >1, maka konsumen pada load point mempunyai nilai keandalan diatas rata-rata

2.5 ETAP (Electric Transient and Analysis Program)

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 atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara



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 ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Amerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara real time, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (one line diagram) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya, hubung singkat, starting motor, transient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

ETAP *PowerStation* memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar single line diagram/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 realnya. Misalnya, ketika anda membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, menempatkan suatu elemen pada sistem, dan mengubah status operasi suatu motor.

2. Total Integration Data

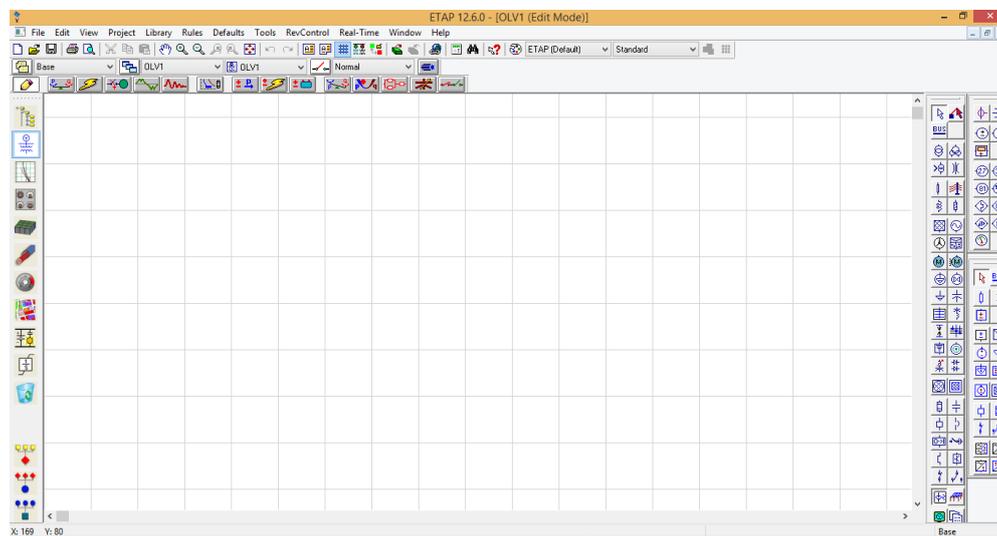
ETAP *PowerStation* menggabungkan informasi sistem elektrikal, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem database yang sama. Misalnya, untuk elemen sebuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya, tapi juga memberikan informasi melalui raceways yang di lewati 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.

3. Simplicity In Data Entry

ETAP *PowerStation* memiliki data yang detail untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses pemasukkan data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di masukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.



Gambar 2.8 Gambar Kerja Editor pada ETAP 12.6

ETAP *PowerStation* dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni load flow (aliran daya), unbalanced load flow (aliran beban tidak seimbang) short circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, cable derating, dll.

ETAP *PowerStation* 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 *PowerStation* adalah:

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

2.5.1 Elemen-elemen Sistem Tenaga Listrik Pada ETAP

Suatu sistem tenaga 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:

1. Data Generator
2. Data Transformator
3. Data Kawat Penghantar
4. Data Beban
5. Data Bus



Gambar 2.9 Elemen-elemen yang Ada di ETAP 12.6

Program analisis ketidakseimbangan 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 perhitungan ketidakseimbangan aliran daya pada software ETAP menggunakan metode *Current Injection*.



Gambar 2.10 Toolbar Unbalanced Load Flow di ETAP 12.6

Gambar dari kiri ke kanan menunjukkan toolbar aliran daya, yaitu:



1. Run Unbalanced Load Flow adalah icon toolbar aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
2. Fault Insertion Open Phase A adalah icon untuk membuat beban tak seimbang.
3. Display Option adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.
4. Alert View adalah icon untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.
5. Report Manager adalah icon untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk report yang dapat dicetak.¹

¹ <http://energi08pnup.blogspot.com/2012/08/tentang-etap-electric-transient-and.html> (diakses pada 23 Mei 2015)