BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Keandalan suatu sistem distribusi tenaga listrik sangat berperan penting terhadap kenyamanan dan keamanan bagi konsumen perusahaan maupun rumah tangga. Indeks keandalan merupakan suatu metode pengevaluasian parameter keandalan suatu peralatan distribusi tenaga listrik terhadap keandalan mutu pelayanan kepada pelanggan. Indeks ini antara lain adalah SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), CAIDI *(Costumer Average Interruption Duration Index),* ASAI *(Average Service Availability Index),* dan ASUI *(Average Service Unavailability In-dex).* Penelitian mengenai indeks keandalan SAIDI dan SAIFI sudah ada yang membahas diantaranya :

Endra Heri Sulino UGM (2011) melakukan penelitian tentang *Evaluasi dan Studi Keandalan Jaringan Distribusi 4 KV Lex Plant Santan Terminal di Chevron Indonesia Company*, menjelaskan tentang SAIFI, SAIDI, dan CAIDI bahwa ketiga hal tersebut merupakan indeks keandalan yang dapat menentukan apakah sistem tersebut di nyatakan sesuai harapan atau tidak.

Dalam penelitiannya yang berjudul "*Analisis Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik di P.T. PLN UPJ Rayon Bumiayu*", Ahmad Fajar Sayidul Yaom UMY (2015) menjelaskan bahwa hanya dua penyulang yang mempunyai nilai

SAIFI dan SAIDI yang handal. Artinya di setiap Gardu Induk harus dilakukan analisis guna mengetahui seberapa besar nilai keandalannya, karena hal tersebut mempengaruhi kualitas listrik yang diberikan ke pelanggan.

Jurnal yang berjudul *Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Berdasarkan SAIDI dan SAIFI*. Pada jurnal ini menganalisa tingkat keandalan SAIDI dan SAIFI pada sistem distribusi yang sudah ada dan membandingkan dengan standar SPLN 59:1985. Hasil penelitian penyulang SLCU dapat dikatakan masih andal, karena nilai indeks keandalannya lebih kecil dari batas maksimal ketentuan atau standar SPLN 59:1985. (Saodah,2008)

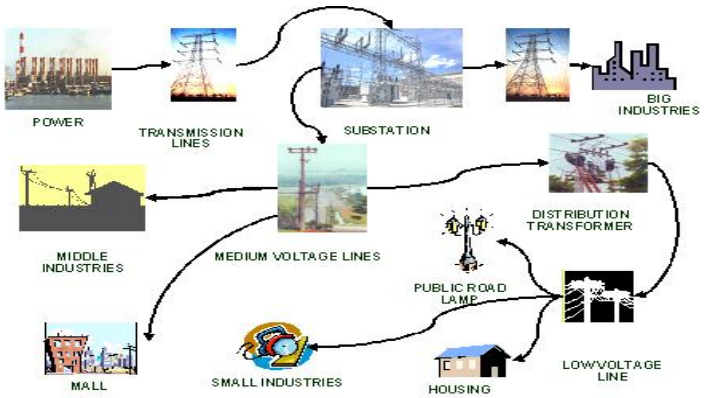
2.2 Landasan Teori

2.2.1. Pengertian Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV ,154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah

untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam system tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2.1 Sistem distribusi tenaga listrik

Sumber : Gonen, Turan, 1996

Tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi di gardu induk diturunkan menjadi tegangan menengah (TM) 20 kV melalui trafo *step down*, kemudian disalurkan ke gardu distribusi atau langsung ke konsumen tegangan menengah 20 kV melalui jaringan distribusi primer. Di gardu induk distribusi tegangan menengah diturunkan menjadi tegangan rendah (TR) melalui jaringan distribusi sekunder (Gonen, Turan, 1996).

Jenis transformator yang digunakan adalah transformator satu phasa dan transformator tiga phase. Adakalanya untuk melayani beban tiga phasa dipakai tiga buah transformator satu phasa dengan hubungan bintang (*star conection*) Y atau hubungan delta (*delta conection*) Δ. Sebagian besar pada jaringan distribusi tegangan tinggi (primer) sekarang ini dipakai transformator tiga phasa untuk jenis *out door*. Yaitu jenis transformator yang diletakkan diatas tiang dengan ukuran lebih kecil dibandingkan dengan jenis *in door*, yaitu jenis yang diletakkan didalam rumah gardu (Suswanto, 2009).

Sistem jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua yaitu sistem jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Kedua sistem tersebut dibedakan berdasarkan tegangan kerjanya. Pada umumnya tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi sekunder adalah 220/380 V (Gonen, Turan, 1996).

Penyaluran daya listrik secara kontinyu dan andal, diperlukan pemilihan sistem distribusi yang tepat. Pemilihan ini didasarkan pada beberapa faktor, antara lain (Pabla, 1991) :

a. Faktor ekonomis
b. Faktor tempat
c. Faktor kelayakan

Dalam pemilihan sistem jaringan harus memenuhi persyaratan – persyaratan antara lain (Pabla, 1991) ;

a. keandalan yang tinggi
b. kontinyuitas pelayanan
c. biaya investasi yang rendah
d. fluktuasi frekuensi dan tegangan yang rendah

Dilihat dari segi manfaat dan kegunaan dari gardu induk itu sendiri, maka peralatan dan komponen dari gardu induk harus memiliki keandalan yang tinggi serta kualitas yang tidak diragukan lagi, atau dapat dikatakan harus optimal dalam kinerjanya sehingga masyarakat sebagai konsumen tidak merasa dirugikan oleh kinerjanya. Oleh karena itu, sesuatu yang berhubungan dengan rekonstruksi pembangunan gardu induk harus memiliki syarat-syarat yang berlaku dan pembangunan gardu induk harus diperhatikan besarnya beban. (Affandi, 2015).

2.2.2. Jaringan Distribusi Primer

Sistem distribusi primer merupakan bagian dari sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari pusat suplai daya besar (*Bulk Power Source*) atau disebut gardu induk ke pusat – pusat beban.

Penurunan tegangan sistem ini dari teganga transmisi pertama pada gardu induk subtransmisi dimana tegangan 150 kV atau ke tegangan 70 kV, kemudian

pada gardu induk distribusi kembali dilakukan penurunan tegangan menjadi 20 kV. Dalam pendistribusian tenaga listrik, harus diperhatikan hal – hal sebagai berikut :

1. Regulasi tegangan pada jaringan tegangan menengah yaitu variasi tegangan pelayanan (tegangan terminal konsumen) harus pada batas – batas yang diijinkan yaitu ±5% dari tegangan kerja untuk sistem radial diatas tanah dan sistem simpulan.
2. Kontinyuitas pelayanan dan pengamanan yaitu tidak sering terjadi pemadaman listrik karena gangguan, dan jika terjadi gangguan dapat dengan cepat diatasi. Hal tersebut dapat dicapai dengan pengamanan dengan peralatan pengaman, pentanahan dan sebagainya.
3. Efisiensi sistem distribusi listrik yaitu menekan serendah mungkin rugi – rugi teknis dengan pemilihan peralatan dan pengoprasiannya yang baik dan juga menekan rugi – rugi non teknis dengan mencegah pencurian dan kesalahan pengukuran.
4. Fleksibelitas terhadap pertambahan beban. Untuk penyaluran tegangan listrik dari sumber daya listrik baik berupa pusat pembangkitan maupun gardu induk sampai ke pusat – pusat beban digunakan jaringan tegangan menengah.

Pada sistem jaringan distribusi primer saluran yang digunakan pada masing – masing beban disebut penyulang (*Feeder*). Pada umumnya setiap penyulang diberi nama sesuai dengan daerah beban yang dilayani, hal ini bertujuan untuk memudahkan mengingat jalur – jalur yang dilayani oleh

penyulang tersebut. Sistem penyaluran tenaga listrik pada jaringan distribusi primer dapat dibedakan menjadi tiga yaitu :

1. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel tanpa isolasi seperti kawat AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), ACSR (*Alluminium conductorsteel reinforce*) dan lain – lain.
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) Jenis penghantar yang dipakai adalah berisolasi seperti MVTIC (*Medium Voltage Twested Insulate Cable).*
3. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel tanam berisolasi PVC (*Poly Venyl Clorida), EXLP* (*Crosslink Polythelene*).

2.2.3. Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder merupakan bagian dari jaringan primer dimana jaringan ini berhubungan langsung dengan konsumen tenaga listrik. Pada jaringan distribusi sekunder, sistem tegangan distribusi primer 20 kV diturunkan menjadi sistem tegangan 220/380 V. Sistem penyaluran daya listrik pada jaringan distribusi sekunder dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel tanpa isolasi seperti kawat AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor).*

2. Saluran Kawat Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kawat berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twested Cable*).

2.2.4. Saluran Udara dan Saluran Bawah Tanah

Sistem distribusi dapat dilakukan baik dengan saluran udara maupun dengan saluran bawah tanah. Biasanya untuk kepadatan beban yang lebih besar di kota – kota atau daerah metropolitan digunakan saluran bawah tanah. Pilihan antara saluran udara dan bawah tanah tergantung pada sejumlah faktor yang sangat berlainan, antara lain pentingnya kontinyuitas pelayanan, arah perkembangan daerah, biaya pemeliharaan tahunan yang sama, biaya modal dan umur manfaat sistem tesebut.

Pada sistem distribusi primer digunakan tegangan menengah tiga fasa tanpa penghantar netral, sehingga terdapat tiga kawat. Beda halnya dengan tegangan rendah, digunakan penghantar netral, sehingga terdapat empat kawat. Di daerah – daerah dengan banyak gangguan cuaca, terutama yang berbentuk petir, saluran dapat dilengkapi dengan kawat petir. Kawat ini dipasang dibagian atas penghantar, dan dihubungkan dengan tanah. Bilamana ada gangguan petir, maka yang terlebuh dahulu tersambar adalah kawat petir itu. Energi petir disalurkan ke bumi melalui sistem pentanahan.

Saluran udara merupakan penghantar energi listrik, tegangan menengah ataupun tegangan rendah, yang dipasang diatas tiang-tiang listrik di luar bangunan. Sedangkan pada kabel tanah penghantarnya dibungkus dengan bahan

isolasi. Kabel tanah dapat dipakai untuk tegangan menengah ataupun tegangan rendah. Sebagaimana namanya, kabel tanah ditanam dalam tanah. Instalasi saluran udara jauh lebih murah dari pada instalasi kabel tanah. Dilain pihak, instalasi kabel tanah lebih mudah pemeliharaannya dibanding dengan saluran udara. Lagi pula, instalasi kabel tanah lebih indah, karena tidak terlihat, sedangkan saluran udara mengganggu pemandangan dan lingkungan. Karenanya, di kota-kota besar dengan kepadatan pemakain energi listrik yang tinggi, saluran tegangan menengah biasanya merupakan kabel tanah, bahkan sering juga saluran tegangan rendah. Tingginya biaya instalasi kabel tanah dapat dipertanggungjawabkan oleh karena tingginya kepadatan pemakain energi listrik. Sekalipun operasi dan pemeliharan lebih mudah, tetapi bilamana terjadi gangguan pada kabel tanah, perbaikannya merupakan pekerjaan yang sukar, lebih-lebih bilamana kabel ini ditanam di jalanan yang lalu-lintasnya padat.

2.2.4.1. Saluran Udara

Saluran udara digunakan pada pemasangan di luar bangunan, direnggangkan pada isolator – isolator diantara tiang – tiang sepanjang beban yang dilalui suplai tenaga listrik, mulai gardu induk sampai ke pusat beban ujung akhir. Jaringan udara direncakan untuk kawasan dengan kepadatan beban rendah atau sangat rendah, misalnya pinggiran kota, kampung/kota – kota kecil, dan tempat tempat – tempat yang jauh serta luas dengan beban tersebar. Saluran udara sering kali digunakan untuk melayani daerah yang sedang berkembang sebagai

tahapan sementara. Kota – kota besar dengan mayoritas perumahan kebanyakan menggunakan jaringan udara.

Bahan yang banyak dipakai untuk kawat penghantar adalah tembaga dan alumunium. Secara teknis, tembaga lebih baik dari pada aluminium, karena memiliki daya hantar arus yang lebih tinggi. Namun karena harga tembaga yang tinggi, semakin lama pemakaian kawat alumunium lebih banyak dipakai. Karena itu kawat alumunium berinti baja ASCR (*Alumunium Cable Steel Reinforced*) banyak dipakai untuk saluran udara tegangan tinggi maupun tegangan menengah. Sedangkan untuk saluran tegangan rendah banyak dipakai kawat alumunium telanjang AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*).

Beberapa pertimbangan untuk saluran udara dapat disebut seperti berikut : Keuntungan atau kelebihan berupa :

a. Penggunaan saluran udara memerlukan investasi yang lebih murah/rendah.
b. Dalam menentukan daerah gangguan pada *feeder* lebih mudah sehingga pemadaman listrik karena perbaikan lokasi gangguan lebih cepat, serta gangguan – ganggua diluar system dapat dikurangi.
c. *Fleksibel* terhadap perkembanga beban.

Kerugian pada saluran udara adalah :

a. Mudah mendapat gangguan dari luar seperti angin, pohon, cuaca buruk dan sebagainnya.
b. Mengganggu keindahan lingkungan.

Penggunaan koduktor saluran udara dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

1. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah merupakan kawat tanpa isolasi yang dipasang diatas tiang yang tingkat keandalannya relatif rendah dibandingkan dengan hantaran jenis lain, yang disebabkan oleh adanya banyak pengaruh gangguan secara langsung baik karena kegagalan alat maupun ganguan dari manusia. Saluran udara ini umumnya masih banyak digunakan pada daerah pedesaan.

Jenis bahan konduktor hantaran udara tegangan menengah adalah :

a. Kawat tembaga atau *Bare Copper Conductor*
b. Kawat aluminium atau *All Alloy Aluminium Conductor* (AAAC)
c. Kawat aluminium berinti kawat baja atau *Aluminium Conductor Steal Reinforced* (ACSR).

2. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Saluran kabel udara tegangan menengah adalah hantaran yang menggunakan konduktor berisolasi yang tingkat keandalannya lebih baik dibandingkan kawat telanjang. Penghantar jenis ini dipergunakan untuk mengganti hantaran udara tegangan menengah pada daerah dengan frekuensi gangguan yang tinggi sehingga keandalan jaringan distribusi primer dapat ditingkatkan secara selektif mungkin mengingat harganya yang relatif mahal. Jenis kabel udara tegangan menengah antara lain :

1. MVTIC atau *Medium Voltage Twested Insulated Cable.*

2.2.4.2. Saluran Bawah Tanah

Sistem saluran konstruksi bawah tanah dalam penyaluran tenaga listrik dengan menggunakan kabel tanah sepanjang daerah beban yang mensuplai tenaga listrik. Keuntungan yang dimiliki oleh sistem jaringan bawah tanah adalah :

1. Keandalan tinggi.
2. Biaya pemeliharaan murah.
3. Kabel tanah tidak mudah diganggu oleh pengaruh-pengaruh hujan, petir dan gangguan alam lainnya.
4. Sistem jaringan bawah tanah tidak menggangu keindahan pemandangan atau lingkungan.

Kerugian sistem jaringan bawah tanah adalah :

1. Biaya investasi tinggi.
2. Bila tejadi gangguan sulit melacak.

Penghantar yang digunakan adalah saluran kabel tanam tegangan menengah (SKTM). Penghantar ini mempunyai keandalan tinggi, sehingga banyak digunakan untuk daerah perkotaan dan industri. Ada dua macam kabel tanam yaitu kabel tanam dengan isolasi minyak dan kabel tanam dengan isolasi plastik (PVC), sedangkan bahan konduktornya adalah tembaga dan aluminium. Kabel adalah suatu penghantar atau susunan dari beberapa penghantar yang dianyam menjadi satu yang kemudian dilapisi dengan isolasi sehingga meniadakan kontak listrik antara satu konduktor dengan konduktor yang lain, jika

kabel tersebut diberikan tegangan tertentu. Komponen pokok kabel adalah bahan konduktornya dan bahan isolasinya.

Kabel terdiri dari tiga bagian utama yaitu :

1. Bahan konduktor
2. Bahan isolasi
3. Bahan pelindung kabel

Bahan konduktor adalah bahan yang dapat mengalirkan arus listrik terus menerus jika antar ujung-ujungnya diberikan beda potensial dalam rangkaian tertutup. Bahan konduktor yang lazim dipakai adalah tembaga dan aluminium atau campurannya.

Adapun konduktor memiliki keuntungan yaitu :

1. Lebih mudah pengerjaannya.
2. Pada umumnya titik cairnya tidak terlalu tinggi, sehingga lebih mudah dikerjakan baik dalam keadaan panas maupun dingin.

Bahan isolasi adalah bahan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik. Bahan isolasi berpengaruh terhadap sifat – sifat elektris, mekanis maupun kimia pada kabel. Bahan pelindung kabel berfungsi sebagai :

1. Melindungi terhadap korosi.
2. Penahan gaya mekanis.
3. Pelindung/pengaman terhadap gaya listrik.

4. Mencegah keluarnya minyak pada pada kabel kertas yang diresapi minyak dan mencegah masuknya uap air kedalam kabel.

2.2.5. Konfigurasi Jaringan Distribusi Primer

Jumlah penyulang yang ada di suatu kawasan/daerah biasanya lebih dari satu. Semakin besar dan kompleks beban yang dilayani di suatu kawasan/daerah maka semakin banyak pula jumlah penyulang yang diperlukan. Beberapa penyulang berkumpul di suatu titik yang disebut gardu hubung (GH).

Gardu hubung adalah suatu instalasi peralatan listrik yang berfungsi sebagai :

1. Titik pengumpul dari suatu atau lebih sumber dan penyulang.
2. Tempat pengalihan beban apabila terjadi gangguan pada salah satu jaringan yang dilayani.

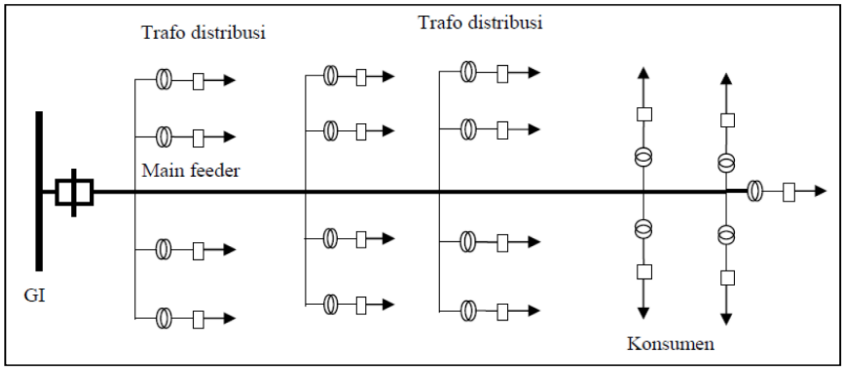
Gabungan beberapa penyulang dapat membentuk beberapa tipe sistem jaringan distribusi primer dapat dibagi menjadi empat yaitu (Pabla, 1991) :

1. Sistem *radial.*
2. Sistem lingkar (*loop/ring*) dan lingkar terbuka (*open loop/open ring*).
3. Sistem *spindel*
4. Sistem gugus (*mesh*)

Masing-masing tipe sistem jaringan distribusi primer tersebut mempunyai karakteristik serta keuntungan dan kerugian masing-masing (Pabla, 1991).

2.2.5.1. Jaringan Distribusi Sistem Radial

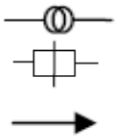
Sistem jaringan distribusi primer tipe radial memiliki jumlah sumber dan penyulang hanya satu buah. Bila terjadi gangguan pada salah satunya (baik sumber maupun penyulangnya), maka semua beban yang dilayani oleh jaringan ini akan padam. Oleh karena itu nilai keandalan dari sistem jaringan distribusi primer tipe radial ini adalah rendah. Sistem ini masih banyak dipergunakan di daerah pedesaan dan perkotaan yang tidak membutuhkan keandalan tinggi.



Gambar 2.2 Sistem Jaringan Distribusi Tipe Radial

Sumber : Gonen, Turan, 1996

Keterangan :



: Trafo

: *Circuit Breaker*

: Beban (konsumen)

Adapun keunggulan dan kelemahan dari sistem saluran radial antara lain adalah :

1. Keunggulan :
   a. Bentuknya sederhana
   b. Biaya investasi relatif murah
2. Kelemahan :
   a. Kualitas pelayanannya kurang baik karena rugi tegangan dan rugi daya pada daya relatif besar.
   b. Kontinyuitas pelayanan daya tidak terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran.
   c. Bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian setelah gangguan akan mengalami pemadaman total.

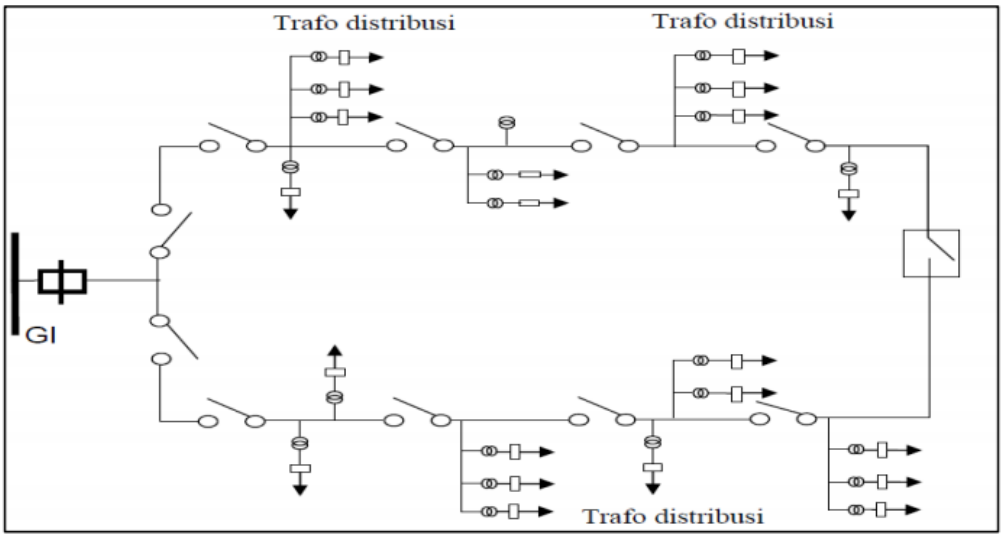
2.2.5.2. Jaringan Distribusi Sistem Lingkar (*Loop/Ring*) dan Lingkar Terbuka (*Open Loop/Ring*)

Sistem jaringan distribusi primer tipe lingkar (*loop/ring*) dan lingkar terbuka (*open loop/ring*) ini merupakan gabungan atau perpaduan dari dua buah sistem radial. Secara umum operasi normal sistem ini hampir sama seperti sistem radial. Hal ini dikarenakan jumlah sumber dan penyulang yang ada pada suatu jaringan adalah lebih dari satu buah.

Pada umumnya sistem ini banyak dipergunakan secara khusus untuk menyuplai beban penting misalnya rumah sakit, pusat-pusat pemerintahan dan instalasi penting lainnya.

Keunggulan dan kelemahann dari sistem saluran ini adalah :

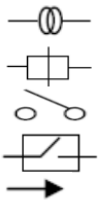
1. Keunggulan
   a. Kontinyuitas penyaluran daya listrik cukup tinggi.
   b. Stabilitas tegangan sistem yang mantap.
   c. Tingkat keamanan dan keandalan yang cukup tinggi.
2. Kelemahan
   a. Biaya pemasangan relatif mahal.
   b. Biaya pemeliharaan tinggi.



Gambar 2.3 Sistem Jaringan Distribusi Primer Tipe Lingkar (*loop/ring*)

Sumber : Gonen, Turan, 1996

Keterangan :



: Trafo Distribusi
: *Circuit Breaker* (CB)
: Saklar Beban
: *Load Break Switch* (LBS)
: Beban (konsumen)

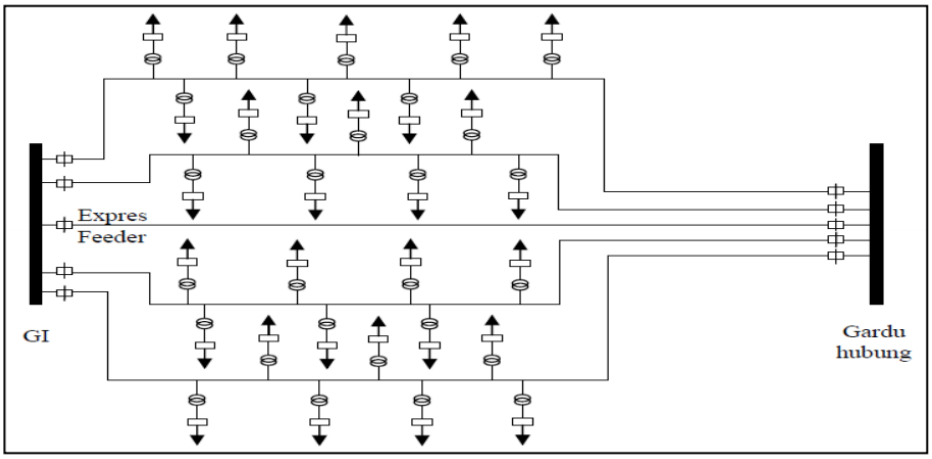
2.2.5.3. Jaringan Distribusi Sistem Spindel

Jaringan primer pola spindel merupakan pengembangan dari pola radial dan loop terpisah. Beberapa saluran yang keluar dari gardu induk diarahkan menuju suatu tempat yang disebut gardu hubung (GH), kemudian antara GI dan GH tersebut dihubungkan dengan satu saluran yang disebut *express feeder*.

Sistem gardu distribusi ini terdapat disepanjang saluran kerja dan terhubung secara seri. Saluran kerja yang masuk ke gardu dihubungkan oleh saklar pemisah, sedangkan saluran yang keluar dari gardu dihubungkan oleh sebuah saklar beban. Jadi sistem ini dalam keadaan normal bekerja secara radial dan dalam keadaan darurat bekerja secara loop melalui saluran cadangan dan GH.

Penyulang tersebut dibagi menjadi dua jenis yaitu (Pablo, 1991):

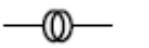
1. Penyulang kerja (*working feeder*) Adalah peyulang yang dioperasikan utuk mengalirkan daya listrik dari sumber pembangkit sampai kepada konsumen, sehingga penyulang ini dioperasikan dalam keadaan bertegangan dan sudah dibebani. Operasi normal penyulang ini hampir sama seperti sistem *radial.*
2. Penyulang cadangan (*express feeder*) Adalah penyulang yang menghubungkan gardu induk langsung ke gardu hubung dan tidak dibebani gardu-gardu distribusi. Pada operasi normal penyulang ini tidak berbeban dan hanya berfungsi sebagai penyulang cadangan untuk mensuplai penyulang tertentu yang mengalami gangguan melalui gardu hubung.

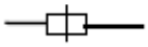


Gambar 2.4 Sistem Jaringan Distribusi Primer Tipe Spindel

Sumber : Gonen Turan, 1986

Keterangan :


: Trafo Distribusi


: *Circuit Breaker* (CB)

: Beban (konsumen)

Keunggulan dan kelemahan dari sistem ini adalah :

1. Keunggulan :

a. Mempunyai keandalan sistem yang lebih tinggi

b. Rugi tegangan dan daya relatif kecil

2. Kelemahan :

a. Beban setiap penyulang terbatas

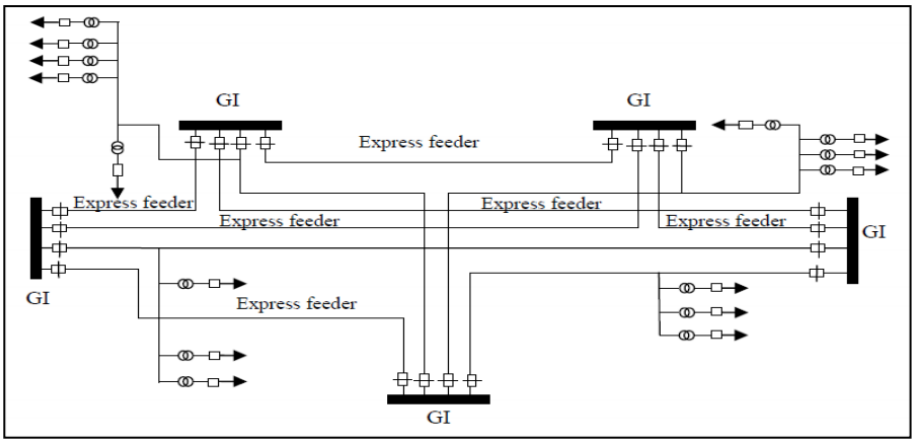
b. Biaya sangat mahal

c. Harus mempunyai tenaga lapangan yang terampil

2.2.5.4. Jaringan Distribusi Sistem Gugus (*Mesh*)

Sistem jaringan distribusi primer gugus (*mesh*) ini merupakan variasi dari sistem spindel. perbedaannya hanya terletak pada bagian penyulang cadangan (*express feeder*). Pada sistem ini penyulang cadangan diberi beban sebagai mana halnya penyulang kerja. Sistem ini mempunyai tingkat keandalan dan kontinyuitas yang lebih baik di bandingkan dengan sistem lingkar (*loop/ring*) ataupun radial.

Sistem ini jarang dipergunakan pada sistem distribusi primer tegangan menengah. Pada umumnya sistem ini diterapkan pada sistem transmisi tegangan tinggi yang sering disebut sebagai sistem interkoneksi.



Gambar 2.5 Sistem Jaringan Distribusi Primer tipe Gugus (*mesh*)

Sumber : Gonen Turan, 1986

Keterangan :

: Trafo Distribusi

: *Circuit Breaker* (CB)

: Beban (konsumen)

Keunggulan dan kelemahan dari sistem saluran ini adalah :

1. Keunggulan :
   a. Mempunyai keandalan sistem yang lebih tinggi
   b. Dapat mengikuti pertumbuhan dan perkembangan beban.
   c. Kualitas tegangan baik dan rugi daya kecil
2. Kelemahan :
   a. Cara pengoperasian sulit
   b. Biaya sangat mahal

2.2.6. Sistem Pengaman Jaringan Distribusi Primer

Sistem pengaman adalah sistem pengaman yang dilakukan kepada peralatan – peralatan listrik yang terpasang di jaringan sistem tenaga listrik terhadap kondisi *abnormal* operasi itu sendiri. Sistem pengaman bertujuan untuk mencegah, membatasi, atau melindungi jaringan dan peralatan terhadap bahaya kerusakan yang disebabkan karena gangguan yang bersifat *temporer* maupun *permanent*, sehingga kualitas dan keandalan penyaluran daya listrik yang diharapkan oleh konsumen dapat terjamin dengan baik.

Beberapa kriteria yang perlu diperhatikan pada sistem pengaman adalah :

1. Kecepatan bertindak (*quikness of action*)
2. Pemilihan tindakan (*selectivity or discrimination action*)
3. Peka (*sensitivity*)

4. Keandalan (*reliability*)

Sistem pengaman jaringan tegangan menengah 20 kV merupakan satu komponen sangat penting yang dirancang untuk mengamankan jaringan dan peralatan tegangan menengah. Secara umum peralatan pengaman yang terdapat pada system jaringan distribusi tegangan menengah adalah Pemutus Tenaga (PMT), Pemisah (PMS), Saklar Seksi Otomatis (SSO), Saklar Beban (SB), *Tie Swicth* (TS), Penutup Balik Otomatis (PBO) /*Recloser* dan Pelebur.

2.2.6.1. Pemutus Tenaga (PMT)/*Circuite Breaker* (CB)

Pemutus Tenaga (PMT) *circuite breaker* (CB) adalah suatu saklar yang bekerja secara otomatis memutus hubungan listrik pada jaringan dalam keadaan berbeban pada saat mengalami gangguan yang disebabkan baik dari luar/*external* maupun dari dalam/*internal*. Dalam sistem pengoperasiannya, alat ini dilengkapi dengan rele arus *Over Current Relay* (OCR) yang berfungsi sebagai pengaman jaringan dari arus lebih.

2.2.6.2. Pemisah (PMS)/*Disconekting Switch* (DS)

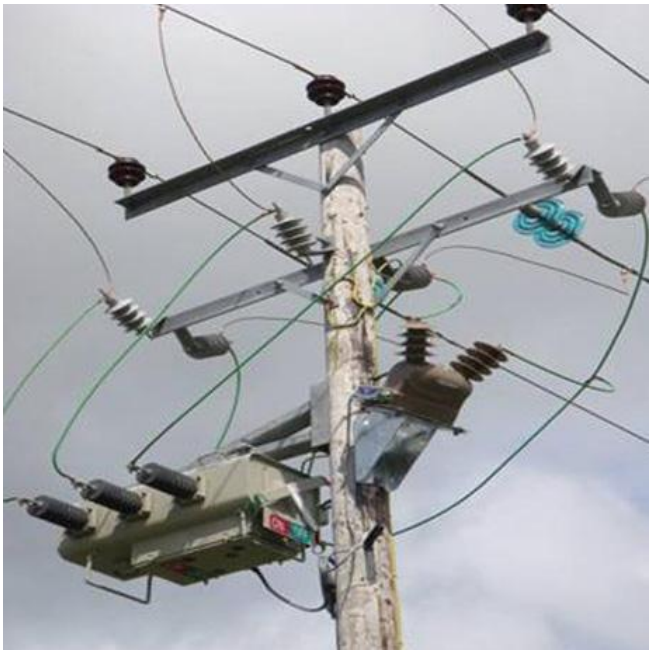
Pemisah (PMS) *Disconekting Switch* (DS) adalah suatu saklar yang berfungsi untuk memisahkan atau menghubungkan suatu jaringan pada saat tidak berbeban (tidak dilairi arus). Pada umumnya alat ini akan difungsikan pada saat diadakan pemeliharaan rutin yang dilakukan oleh PLN.

2.2.6.3. *Load Break Switch* (LBS)

Saklar pemutus beban (*Load Break Switch, LBS*) merupakan saklar atau pemutus arus tiga phasa untuk penempatan di luar ruas pada tiang pancang, yang dikendalikan secara manual maupun secara elektronis. *load break switch* (LBS) mirip dengan alat pemutus tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) dan biasanya dipasang dalam saluran distribusi listrik.

Monitoring dan pengendaliannya menggunakan sistem SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) dengan peralatan modul pengontrol berupa RTU (*Remote Terminal Unit*). Basis komunikasi antara RTU pada panel LBS dan ruang kontrol PLN secara umum terdiri dari dua jenis, yaitu GPRS dan radio.

load break switch (LBS) berfungsi sebagai peralatan hubung yang bekerja membuka dan menutup rangkaian arus listrik , mempunyai kemampuan memutus arus beban dan tidak mampu memutus arus gangguan. *load break switch* (LBS) juga berfungsi sebagai pemutusan lokal atau penghubung instalasi listrik 20 kV pada saat dilakukan perawatan jaringan distribusi pada daerah tertentu sehingga tidak mengganggu daerah lain yang masih beroperasi.



Gambar 2.6 *Load Break Swich* (LBS)

Sumber : Swastika Mahardika, 2014

Gambar 2.7 Kubikel / Panel pengendali *Load break switch* (LBS)

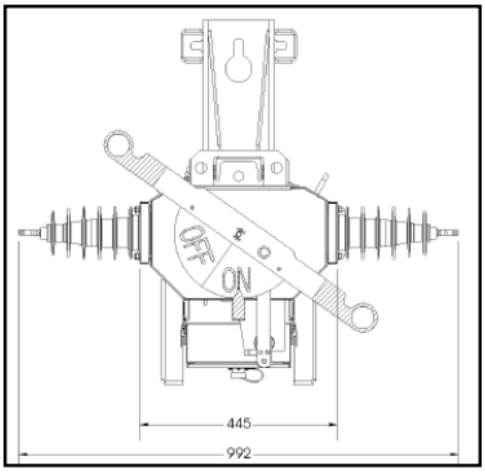
Sumber : Swastika Mahardika, 2014

Sistem pengendalian elektronik *load break switch* (LBS) ditempatkan pada sebuah kotak pengendali yang terbuat dari baja anti karat sehingga dapat digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan. Panel pengendali atau kubikel LBS merupakan alat yang mempermudah dalam proses pengoprasian *load break switch* (LBS), serta harus rutin pada pemeliharaannya.

2.2.6.4. Jenis Pengendalian *load break switch* (LBS)

Jenis pengendalian *load break swich* (LBS) ada 2 yaitu :

1. Secara manual



Gambar 2.8 *Load Break Switch* (LBS)

Sumber : Swastika Mahardika, 2014

Pada umumnya jika pengontrolan jarah jauh tidak bisa berjalan dengan baik maka langkah selanjutnya adalah pemutusan dan penyambungan beban secara manual yaitu dengan cara menarik tuas dengan menggunakan *hook stick* yang terdapat pada gambar 2.8. Gambar 2.8 merupakan bagian peralatan utama LBS. Terdapat tulisan OFF dan ON, warna tulisan OFF merah, sedangkan ON berwarna hijau. Jika kita menarik tuas berlawanan arah jarum jam maka LBS akan mengalami kondisi OFF. Sebaliknya jika tuas ditarik searah jarum jam berarti LBS dalam kondisi ON. Pekerjaan ini dilakukan oleh petugas rayon maupun dari operasi distribusi, untuk peralatannya menggunakan *hook stick* dan juga peralatan K3 untuk keamanan petugas pelaksana.

2. Secara terkontrol

Yaitu dengan pemutusan dan penyambungan secara jarak jauh menggunakan sistem SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) yang dibangun oleh PLN, dengan ini proses pemutusan maupun penghubungan beban menjadi lebih mudah.

2.2.6.5. Saklar Seksi Otomatis (SSO) *Sectionalizer*

Saklar Seksi Otomatis (SSO) *Secsitionalizer* adalah suatu saklar yang bekerja secara otomatis berdasarkan waktu dan perhitungan arus gangguan yang mengalir pada jaringan. Alat ini berfungsi sebagai pemisah (pembagi) jaringan distribusi. Dalam sistem pengoperasiannya alat ini dilengkapi dengan pendeteksi arus gangguan.

Jika jumlah hitungan arus gangguan yang mengalir telah sesuai dengan yang telah ditentukan, maka alat ini akan membuka secara otomatis. Alat ini dapat dioperasikan pada saat jaringan dalam keadaan berbeban.

2.2.6.6. Penutup Balik Otomatis (PBO) *Recloser*

Penutup balik otomatis (PBO) *Recloser* (*Automatic circuit recloser*) adalah suatu peralatan yang bekerja secara otomatis untuk dapat mengamankan sistem dari gangguan hubung singkat. *Recloser* terdiri dari bagian-bagian yang dapat merasakan arus lebih, mengatur kelambatan waktu, memutuskan arus gangguan serta menutup kembali secara otomatis guna mengisi kembali (*reenergize*) jaringan. Pada gangguan permanen *recloser* akan tetap terbuka (mengerjakan pemutusan menetap) dan memisahkan bagian yang terganggu dari bagian yang utama dari sistem. *Recloser* yang dilengkapi dengan fungsi buka dan tutup secara otomatis sangat berguna untuk menghilangkan gangguan yang berkepanjangan pada sistem yang diakibatkan oleh keadaan gangguan temporer atau arus lebih yang tiba-tiba (*transient over current*). Bila *recloser* mendeteksi adanya arus gangguan di daerah pengamannya maka *recloser* akan memutuskan arus (membuka kontaktor), kemudian dengan waktu tunda yang ditentukan secara otomatis akan menutup kembali kontak. Jika masih dirasakan adanya gangguan maka *recloser* akan bekerja membuka dan menutup berturut-turut sampai 3 atau 4 kali langsung mengunci.

2.2.6.7. Pelebur (*Fuse cut out*)

Pelebur (*fuse cut out*) adalah suatu alat pemutus aliran daya listrik pada jaringan bila terjadi gangguan arus lebih. Alat ini dilengkapi dengan *fuse link* yang terdiri dari elemen lebur. Bagian inilah yang akan langsung melebur jika dialiri arus lebih pada jaringan. Besarnya *fuse link* yang digunakan tergantung dari perhitungan jumlah beban (arus) maksimum yang dapat mengalir pada jaringan yang diamankan.

2.2.7. Gangguan Sistem Jaringan Distribusi Primer

Kondisi gangguan pada sistem jaringan distribusi primer tegangan menengah 20 kV dapat dibedakan berdasarkan penyebabnya yaitu :

1. Penyebab dari faktor luar
2. Penyebab dari faktor dalam

2.2.7.1. Penyebab Gangguan Dari Faktor Luar

Faktor – factor luar yang menyebabkan terjadinya gangguan yaitu :

1. Cuaca misalnya hujan, angin kencang, gempa bumi dan petir.
2. Mahluk hidup misalnya manusia, binatang dan tumbuhan.
3. Benda – benda lain.

Jenis gangguan (*fault*) pada sistem distribusi saluran udara dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu (SPLN 52-3, 1983) :

1. Gangguan yang bersifat temporer Gangguan temporer atau gangguan sesaat dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya.
2. Gangguan yang bersifat permanen Untuk membebaskan gangguan yang bersifat permanen diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

2.2.7.2. Penyebab Gangguan Dari Faktor Dalam

Gangguan yang disebabkan oleh faktor dalam umumnya besifat permanen, misalnya peralatan tidak sesuai standar yang ditetapkan, pemasangan alat yang tidak sesuai atau salah dan penuaan peralatan. Gangguan yang disebabkan faktor dalam dapat dibagi menjadi dua macam yaitu :

a. Gangguan sistem

   Gangguan sistem jaringan distribusi primer tegangan menengah 20 kV yang diakibatkan oleh gangguan pada sistem pembangkit tenaga lisatrik atau system jaringan trasmisi tegangan tinggi. Pada umumnya gangguan ini akan menyebabkan pemadaman yang mencakup daerah yang luas.

b. Gangguan jaringan

   Gangguan sistem jaringan distribusi primer tegangan tegangan menengah 20 kV mengakibatkan putusnya pasokan daya listrik dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik ke daerah – daerah tertentu. Pada umumnya penyebab gangguan jaringan adalah :

1. Gangguan peralatan Gangguan ini dapat diakibatkan oleh kerusakan kabel instalasi pada gardu hubung atau penuaan alat.
2. Gangguan akibat penyulang lain Pada keadaan jumlah penyulang yang tidak bekerja atau *trip* lebih dari satu, maka untuk menentukan penyulang yang terganggu didasarkan pada indikasi rele proteksi yang bekerja. Bila indikasi rele yang kerja menunjukkan gangguan *over current* dan *ground fault* maka dapat dipastikan penyulang tersebut yang terganggu. Bila indikasi gangguan yang muncul hanya *ground fault* saja maka dapat dikatakan bahwa terjadi gangguan akibat penyulang lain.
3. Gangguan mahluk hidup Pada umumnya gangguan ini bersifat sementara/temporer dan penyebab langsung dapat dihilangkan, misalnya kelalaian manusia dalam mengoperasikan peralatan, dahan pohon dan binatang yang menempel pada kabel instalasi. Gangguan jaringan ditribusi yang disebabkan baik dari luar maupun dari dalam dapat mengakibatkan terjadinya tegangan lebih atau hubung singkat. Hubung singkat yang mungkin terjadi adalah :

a. Gangguan hubung singkat 3 phasa
b. Gangguan hubung singkat 2 phasa
c. Gangguan hubung singkat 1 phasa

2.2.8. Manuver Sistem Jaringan Distribusi Primer

Manuver sistem jaringan distribusi primer tegangan menengah 20 KV merupakan serangkaian kegiatan membuat modifikasi terhadap kondisi operasi normal jaringan akibat adanya pekerjaan ataupun gangguan yang bersifat permanen pada jaringan yang memerlukan waktu relatif lama sehingga tetap tercapai kondisi penyaluran daya listrik yang optimal. Manuver jaringan pada kondisi operasi normal menggunakan jaringan tipe radial yang dikembangkan menjadi jaringan tipe lingkar terbuka (*open loop/ring*) yang melewati gardu hubung atau saklar - saklar beban.

Dengan adanya sistem manuver jaringan, maka waktu pemadaman dapat dipersingkat dan daerah pemadaman dapat dipersempit sehingga *losses* kWh terjadi dapat ditekan seminimum mungkin . Manuver jaringan membutuhkan keandalan sistem yang mampu menanggung beban baik dari sisi pengaman, penghantar maupun daya listrik yang akan disalurkan sehingga susut tegangan dan *losses* daya listrik yang terjadi pada ujung jaringan masih berada dalam batas (toleransi yang telah ditentukan). Manuver jaringan pada sistem jaringan distribusi primer tegangan menengah 20 kV dilakukan dengan menggunakan dua cara yaitu:

1. *Remote Control*
2. Manual

2.2.9. Keandalan (*Reliability*) Pada Sistem Distribusi

2.2.9.1. Konsep Dasar Keandalan Pada Sistem Distribusi

Setiap benda dapat mengalami kegagalan dalam mengoperasikan peralatan ada beberapa penyebab kegagalan pengoperasian ini adalah :

1. Kelalaian manusia.
2. Perawatan yang buruk.
3. Kesalahan dalam penggunaan.
4. Kurangnya perlindungan terhadap tekanan lingkungan yang berlebihan.

Akibat yang ditimbulkan dari kegagalan dalam proses dan sistem ini bervariasi dari ketidaknyamanan pengguna hingga kerugian biaya ekonomis yang cukup tinggi bahkan timbulnya korban jiwa manusia. Teknik keandalan bertujuan untuk mempelajari konsep, karakteristik, pengukuran, analisis kegagalan dan perbaikan sistem sehingga menambah waktu ketersediaan operasi sistem dengan cara mengurangi kemungkinan kegagalan.

2.2.9.2. Istilah Keandalan (*Reliability*) Pada Sistem Distribusi

Istilah keandalan dalam sistem distribusi adalah suatu ukuran ketersediaan/tingkat pelayanan penyediaan tenaga listrik dari sistem ke pemakai/pelanggan. Ukuran keandalan dapat dinyatakan sebagai seberapa sering sistem mengalami pemadaman, berapa lama pemadaman terjadi dan berapa cepat waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan kondisi dari pemadaman yang terjadi (*restoration*).

Perkembangan teknik keandalan dan perawatan dimotifasi oleh beberapa faktor antara lain :

a. Bertambahnya kompleksitas dan kerumitan sistem.
b. Kesadaran dan harapan masyarakat tentang kualitas suatu produk.
c. Hukum dan aturan mengenai kerusakan produk.
d. Kebijaksanaan pemerintah tentang spesifikasi kemampuan keandalan dan perawatan.
e. Penurunan keuntungan yang menunrun akibat timbulnya biaya tinggi dari kegagalan peralatan, perbaikan peralatan dan program jaminan.

Sistem yang mempunyai keandalan tinggi akan mampu memberikan tenaga listrik setiap saat dibutuhkan, sedangkan sistem yang mempunyai keandalan rendah bila tingkat ketersediaanya rendah, yaitu seringnya padam.

Adapun macam-macam tingkatan keandalan dalam pelayanan dapat dibedakan menjadi 3 hal antara lain (Tim Kajian Perencanaan Sistem Distribusi Tenaga Listrik, 2005) :

1. Sistem dengan keandalan tinggi (*High Reliability Sistem*).

Pada kondisi normal, sistem akan memberikan kapasitas yang cukup untuk menyediakan daya pada beban puncak dengan variasi tegangan yang baik. Dalam keadaan darurat bila terjadi gangguan pada jaringan, maka sistem ini tentu saja diperlukan beberapa peralatan dan pengamanan yang cukup banyak untuk menghindarkan adanya berbagai macam gangguan pada sistem.

2. Sistem dengan keandalan menenganh (*Medium Reliability Sistem*)

Pada kondisi normal sistem akan memberikan kapasitas yang cukup untuk menyediakan daya pada beban puncak dengan variasi tegangan yang baik. Dalam keadaan darurat bila terjadi gangguan pada jaringan, maka sistem tersebut masih bias melayani sebagian dari beban meskipun dalam kondisi beban puncak. Dalam system ini diperlukan peralatan yang cukup banyak untuk mengatasi serta menaggulangi gangguan-gangguan tersebut.

3. Sistem dengan keandalan rendah (*Low Reliability Sistem*)

Pada kondisi normal sistem akan memberikan kapasitas yang cukup untuk menyediakan daya pada beban puncak dengan variasi tegangan yang baik. Jika terjadi gangguan pada jaringan, sistem sama sekali tidak bisa melayani beban tersebut. Jadi perlu diperbaiki terlebih dahulu, tentu saja pada sistem ini peralatanperalatan pengamanannya relatif sedikit.

Kontinyuitas pelayanan, penyaluran jaringan distribusi tergantung pada jenis dan macam sarana penyalur dan peralatan pengaman, di mana sarana penyaluran (jaringan distribusi) mempunyai tingkat kontinyuitas yang tergantung pada susunan saluran dan cara pengaturan sistem operasiannya, yang pada hakekatnya direncanakan dan dipilih untuk memenuhi kebutuhan dan sifat beban.

Tingkat kontinyuitas pelayanan dari sarana penyaluran di susun berdasarkan lamanya upaya menghidupkan kembali suplai telah pemutusan karena gangguan. Tingkatan kontinyuitas pelayanan dapat dibedakan menjadi 4 yaitu : (SPLN 52-3, 1983) :

1. Tingkat 1

   Dimungkinkan padam berjam-jam, yaitu waktu yang diperlukan untuk mencari dan memperbaiki bagian yang rusak karena gangguan.

2. Tingkat 2

   Padam beberapa jam, yaitu yang diperlukan untuk mengirim petugas ke lapangan, melokalisasi kerusakan dan melakukan manipulasi untuk menyalakan sementara kembali dari arah atau saluran yang lain.

3. Tingkat 3

   Pada beberapa menit, yaitu manipulasi oleh petugas yang siap sedia di gardu atau dilakukan deteksi/pengukuran dan pelaksanaan manipulasi jarak jauh dengan bantuan DCC (*Distribution Control Centre*).

4. Tingkat 4

   Padam beberapa detik, yaitu pengamanan dan manipulasi secara otomatis dari DCC (*Distribution Control Centre*) Tanpa Padam yaitu jaringan yang dilengkapi instalasi cadangan terpisah dan otomatis secara penuh dari DCC (*Distribution Control Centre*).

2.2.9.3. Faktor – faktor yang mempengaruhi Keandalan Sistem Distribusi

Beberapa faktor yang harus diperhitungkan untuk menjaga keandalan kerja system distribusi adalah sebagai berikut :

a. Suhu

Suhu membatasi besarnya arus beban, ini berarti bahwa beban untuk tipe system elemen lebih ditentukan oleh suhu dari pada mekanis dan batas – batas tersebut berubah untuk susunan beban dan keadaan cuaca yang berbeda, jadi daerah yang membatasi akan didapatkan untuk mengatur beban dalam berbagai keadaan. (As Pabla, Abdul hadi, 1991)

b. Ekonomis

Tingkat ekonomi pembebanan dicapai bila hanya untuk membayar kerugian sama dengan hanya mengurangi kerugian (berdasarkan biaya tahunan), meskipun pada kota yang padat beban, pembebanan yang normal pada komponen di bawah batas ekonomi, ini dipakai untuk menjaga agar batas tidak dilampau meskipun untuk waktu sesaat dalam keadaan darurat. (As Pabla, Abdul Hadi, 1991)

c. Tegangan Jatuh

Jatuh tegangan pada saluran adalah selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (sending) dan tegangan pada ujung penerimaan (receiving) tenaga listrik. Pada saluran arus bolak balik, besar tegangan tergantung dari

impedansi dan admitansi saluran serta pada beban dan faktor kerja. (Kumawahara, arismunandar, 1993)

d. Tegangan Lebih (As Pabla, Abdulhadi, 1991)

Diluar tegangan jatuh komponen-komponen harus mampu menghadapi loncatan tegangan yang ditimbulkan system sendiri atau sumber dari luar.

2.2.9.4. *Sistem Avarage Interuption Frequensi Index* (SAIFI)

Indeks ini didefinisikan sebagai jumlah rata-rata kegagalan yang terjadi per pelanggan yang dilayani oleh sistem per satuan waktu (umumnya pertahun). Indeks ini ditentukan dengan membagi jumlah semua kegagalan pelanggan dalam satu tahun dengan jumlah pelanggan yang dilayani oleh sistem tersebut. Persamaan SAIFI didefinisikan sebagai berikut (SPLN 59 : 1985)

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum_{i=1}^{m} C_i}{N} \frac{\text{pemadaman}}{\text{tahun}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.1)$$

Dimana :

m : jumlah pemadaman dalam satu tahun

Ci : jumlah konsumen yang mengalami pemadaman

N : jumlah konsumen yang dilayani

Atau sesuai Surat Edaran Direksi Perusahaan Umum Listrik Negara Nomor 031.E/471/DIR/1993 tentang Evaluasi Keandalan Penyediaan Tenaga Listrik dan sesuai buku panduan *Power System Engeneering* Bidang Distribusi : Keandalan Sistem Distribusi (PT PLN (Persero) Jasa Diklat, 2005): maka SAIFI dapat dihitung dengan :

$$SAIFI = \frac{Jumlah\ pelanggan\ padam}{Jumlah\ pelanggan\ yang\ di\ layani}\ Kali/Plg/Thn \quad \text{.....(2.2)}$$

Indeks keandalan ini dapat juga dihitung dari angka keluaran komponen yang menyebabkan pemadaman.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_k M_k}{\sum M}\ \frac{Pemadaman}{Tahun} \quad \text{.....(2.3)}$$

2.2.9.5. Sistem *Average Interruption Duration Index* (SAIDI)

Indeks ini didefinisikan sebagai nilai rata-rata dari lamanya kegagalan untuk setiap konsumen selama satu tahun. Indeks ini ditentukan dengan pembagian jumlah dari lamnya kegagalan secara terus-menerus untuk semua pelanggan selama periode waktu yang telah ditentukan dengan jumlah pelanggan yang dilayani selama satu tahun itu. Persamaan SAIDI didefinisikan sebagai berikut (SPLN 59 : 1985)

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^{m} C_i . t_i}{N}\ \frac{\text{jam}}{\text{tahun}} \quad \text{.....} \quad (2.4)$$

dimana :

m : jumlah pemadaman dalam satu tahun

Ci : jumlah konsumen yang mengalami pemadaman

ti : lamanya tiap-tiap pemadaman

N : jumlah konsumen yang dilayani

Atau sesuai Surat Edaran Direksi Perusahaan Umum Listrik Negara Nomor 031.E/471/DIR/1993 tentang Evaluasi Keandalan Penyediaan Tenaga Listrik dan sesuai buku Panduan *Power System Engeneering* Bidang Distribusi : Keandalan Sistem Distribusi (PT PLN (Persero) Jasa Diklat, 2005) : maka SAIDI dapat dihitung dengan :

$$SAIDI = \frac{Jumlah\ Total\ Durasi\ Gangguan\ Konsumen}{Jumalh\ Total\ Konsumen\ Terlayani}\ \ Kali/Plg/Thn \quad \text{.....(2.5)}$$

Indeks keandalan ini juga dapat dihitung dari angka keluaran komponen yang menyebabkan pemadaman dan waktu pemulihan pelayanan.

$$SAIDI = \frac{\sum U_k\, M_k}{\sum M}\ \frac{Jam}{Tahun} \quad \text{.....(2.6)}$$

Keterangan :

Uk = waktu perbaikan peralatan

Mk = jumlah pelanggan pada titik beban

M = total pelanggan terlayani

2.2.9.6. CAIDI *(Costumer Average Interruption Duration Index).*

Indeks ini menggambarkan lama waktu (durasi) rata-rata setiap pemadaman.Indeks ini dirumuskan dengan:

$$CAIDI = \frac{Total\ durasi\ pemadaman}{Total\ \ frekuensi\ pemadaman}$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i\, N_i}{\sum \lambda_i N_i} \quad \text{.....(2.7)}$$

Indeks ini juga sama dengan perbandingan antara SAIDI dengan SAIFI:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad \text{.....(2.8)}$$

Besarnya nilai CAIDI ini dapat digambarkan sebagai besar durasi pemadaman (r) sistem distribusi keseluruhan ditinjau dari sisi pelanggan.

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

Indeks ini menggambarkan tingkat ketersediaan layanan (suplai daya) yang diterima oleh pelanggan. Indeks ini dirumuskan dengan:

$$ASAI = \frac{Jumlah\ durasi\ ketersediaan\ suplai\ daya\ ke\ pelanggan}{Jumlah\ durasi\ suplai\ daya\ yang\ di\ butuhkan\ oleh\ pelanggan}$$

$$ASAI = \frac{\sum N_i x\ 8760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i x\ 8760} \quad \text{.....(2.9)}$$

Keterangan :

8760 adalah total jumlah jam dalam satu tahun kalender.

2.2.9.8. ASUI *(Average Service Unavailability In-dex).*

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

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

$$ASUI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i\ x\ 8760} \quad \text{.....(2.10)}$$

Indeks ini juga dapat dicari dengan rumus:

ASUI = 1 – ASAI

2.2.9.9. Kegunaan Dari Indeks Keandalan Sistem

Kegunaan dari informasi indeks keandalan sistem adalah sangat luas. Ada beberapa kegunaan yang paling umum yaitu (Billiton, R dan Billiton, J.E, 1989) :

1. Melengkapi menejemen dengan data capaian mengenai mutu layanan pelanggan pada sistemm listrik secara keseluruhan.
2. Untuk mengidentifikasi sub sistem dan sirkit dengan capaian dibawah standar untuk memastikan penyebabnya.
3. Melengkapi menejemen dengan data capaian mengenai mutu layanan pelanggan mengenai untuk masing-masing area operasi.
4. Menyediakan sejarah keandalan dari sirkit individu untuk diskusi dengan pelanggan sekarang atau calon pelanggan.
5. Memenuhi syarat pelaporan pengaturan.
6. Menyediakan suatu basis untuk menetapkan ukuran-ukuran kesinambungan layanan.
7. Menyediakan data capaian yang penting bagi suatu pendekatan probabilistik untuk studi keandalan sistem distribusi.

2.2.9.10. Standar Nilai Indeks Keandalan

a. Standar Nilai Indeks Keandalan SPLN 68 - 2 : 1986

Tabel 2.1 Sandar Indeks Keandalan SPLN 68 - 2 : 1986

Indikator Kerja	Standar Nilai	Satuan
SAIFI	3.2	kali/pelanggan/tahun
SAIDI	21.09	jam/pelanggan/tahun

b. Standar Nilai Indeks Keandalan IEEE std 1366-2003

Tabel 2.2 Standar Indeks Keandalan IEEE std 1366-2003

Indikator Kerja	Standar Nilai	Satuan
SAIFI	1.45	kali/pelanggan/tahun
SAIDI	2.3	jam/pelanggan/tahun
CAIDI	1.47	Jam/gangguan
ASAI	99.92	Persen

c. Standar Nilai Indeks Keandalan WCS (*World Class Service*) & WCC (*World Class Company*)

Tabel 2.3 Standar Nilai Indeks Keandalan WCS (*World Class Service*) & WCC (*World Class Company*)

Indikator Kerja	Standar Nilai	Satuan
SAIFI	3	kali/pelanggan/tahun
SAIDI	1.666	jam/pelanggan/tahun