

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Indeks keandalan merupakan suatu angka atau parameter yang menunjukkan tingkat pelayanan serta tingkat keandalan sejauh mana listrik dapat tersalurkan ke pelanggan. Indeks-indeks keandalan yang sering digunakan dalam suatu sistem distribusi adalah SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). Dari penelitian ini terdapat referensi dari beberapa sumber yang sebelumnya telah melakukan penelitian tentang indeks keandalan SAIDI dan SAIFI guna dijadikan badan perbandingan serta pertimbangan dalam masalah yang terjadi yang berhubungan dengan topik yang diambil, beberapa referensi diantaranya sebagai berikut :

1. Tri Aji Bondan Laksono UMY (2016) melakukan penelitian tentang analisis keandalan sistem distribusi tenaga listrik di PT. PLN (persero) UPJ Bantul dengan menggunakan data monitoring gangguan yang terjadi selama tahun 2015. Dari penelitian ini dapat disimpulkan nilai SAIFI dan SAIDI pada penyulang Gardu Induk Bantul Sewon yang berada di wilayah kerja area Bantul yaitu Rayon Bantul dapat dikategorikan handal karena lebih kecil dari standar nilai SAIFI dan SAIDI menurut SPLN No 68-21986 dan IEEE std 1366-2003. Sedangkan nilai SAIFI dan SAIDI lebih besar dari nilai standar WCC (*word class company*) dan WCS (*word class service*) sehingga dikategorikan kurang handal.
2. Ibnu Faishal UMY (2017) melakukan penelitian tentang analisis keandalan sistem jaringan distribusi di gardu induk kentungan penyulang KTN-06 PT.PLN (persero) area Yogyakarta dengan metode *section technique* dengan menggunakan data monitoring tahun 2015.

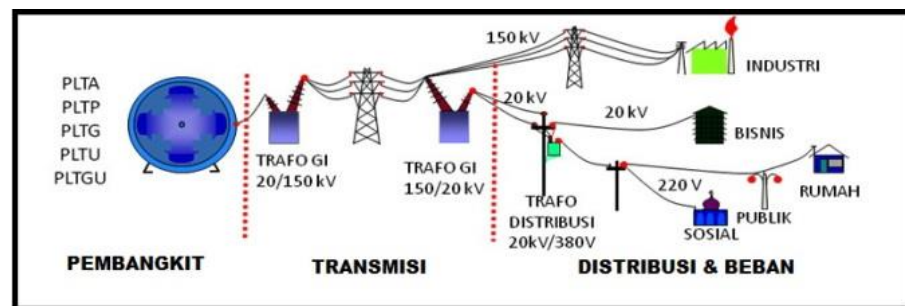
Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan nilai SAIFI dan SAIDI dikatakan handal karena masih di bawah nilai standar yang ditentukan oleh SPLN 68-2: 1986. Dan besar energi listrik yang tidak tersalurkan akibat gangguan yang terjadi pada penyulang KTN 06 dalam tahun 2015, ENS (*Energy Not Supplied*) = 66.674,10 kWh atau 66,67 MWh dan AENS (*Average Energy Not Supplied*) = 8,441897238 kWh/pelanggan.

3. Jurnal Yusuf Ridho, Surya Dharma Nainggolar, Firdaus (2016) melakukan penelitian mengenai analisis keandalan berbasis sistem pada jaringan distribusi 20kV UPJ PT. PLN (persero) area Pekan Baru Rayon Panam menggunakan data monitoring gangguan yang terjadi selama tahun 2015 dengan menggunakan metode SAIDI dan SAIFI. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa nilai indeks SAIFI dari keseluruhan *feeder* ada 7 (tujuh) *feeder* yang dapat dikategorikan handal, karena nilai indeks keandalannya lebih rendah dari target PT. PLN (persero) Rayon Panam dan ada 2 (dua) *feeder* yang dikategorikan tidak handal karena nilai indeks keandalannya lebih tinggi dari target PT. PLN (persero) Rayon Panam. Serta nilai indeks SAIDI dari keseluruhan *feeder* ada 5 (lima) *feeder* yang dapat dikategorikan handal karena nilai indeks keandalannya lebih rendah dari target PT. PLN (persero) Rayon Panam dan ada 4 (empat) *feeder* yang dikategorikan tidak handal karena nilai indeks keandalannya lebih tinggi dari target PT. PLN (persero) Rayon Panam.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik yang lengkap terdiri dari empat unsur, yaitu pembangkit tenaga listrik, saluran transmisi, saluran distribusi dan pemakaian tenaga listrik atau beban. Gambar 2.1 memperlihatkan skema sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sumber: <https://bit.ly/2GSST5K>, diakses pada 23 Mei 2018

Dari Gambar 2.1 di atas dapat dijelaskan bahwa prinsip kerja dalam sistem tenaga listrik dimulai dari pembangkit kemudian disalurkan melalui sistem jaringan transmisi menuju gardu induk dan dari gardu induk ini disalurkan kepada konsumen melalui saluran distribusi. Ada juga konsumen yang mendapat pelayanan langsung dari saluran transmisi biasanya konsumen ini membutuhkan tegangan yang besar dan daya yang besara pula.

2.2.2 Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit tenaga listrik adalah salah satu bagian sistem tenaga listrik, pada pembangkit listrik terdapat peralatan elektrikal, mekanikal, dan bangunan kerja. Terdapat komponen-komponen utama pembangkit yaitu generator, turbin yang berfungsi untuk mengkonversi energi (potensial) mekanik menjadi energi (potensial) listrik. Tegangan yang keluar dari generator harus dinaikkan lebih dahulu guna untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan arus rendah yang mengalir pada saluran transmisi maka dapat mengurangi rugi-rugi daya. Pembangkit tenaga listrik terdiri dari berbagai jenis pusat tenaga listrik, seperti pembangkit listrik tenaga disel (PLTD), pembangkit listrik tenaga uap (PLTA), pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) dan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN).

2.2.3 Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari generator station/ pembangkit listrik sampai

saluran distribusi hingga pada konsumen pengguna listrik. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor yang mengalirkan tenaga listrik berdasarkan kategori saluran transmisi.

Saluran transmisi dapat dibedakan menjadi dua kategori berdasarkan konstruksinya, yaitu saluran udara (*overhead line*) dan saluran bawah tanah (*underground*). Sistem saluran udara menyalurkan tenaga listrik melalui penghantar-penghantar yang digantungkan pada tiang-tiang transmisi dengan perantara isolator-isolator, sedangkan sistem saluran transmisi bawah tanah menyalurkan tenaga listrik melalui kabel-kabel bawah tanah. Dari kedua kategori penyaluran ini mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Saluran transmisi udara yang sangat rentan terjadinya gangguan atau kerusakan yang diakibatkan pengaruh cuaca seperti hujan, petir, dan lain sebagainya. Saluran udara sendiri kurang baik karena dapat mengganggu lingkungan dan pemandangan akibat tiang-tiang dari saluran transmisi udara. Adapun kelebihan nya adalah perbaikan lebih mudah jika terjadi kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan. Sedangkan saluran transmisi bawah tanah memiliki kelebihan tidak terpengaruh oleh perubahan cuaca seperti angin kencang, petir, dan lain sebagainya. Saluran transmisi bawah tanah juga lebih estetik karena tidak mengganggu lingkungan dan pandangan. Kekurangan dari saluran transmisi bawah tanah adalah biaya pembangunannya yang lebih mahal dibanding saluran udara dan perbaikannya lebih sulit bilamana terjadi gangguan.

Pada saluran transmisi dapat menyalurkan tenaga listrik dengan beberapa tegangan nominal. Berdasarkan dokumen IEC (International Electrotechnical Commission) 60038, tegangan transmisi dapat dikelompokkan menjadi : Tegangan Menengah (1kV – 35kV), Tegangan Tinggi (35kV – 230kV), Tegangan Ekstra Tinggi (230kV – 800kV), dan Tegangan Ultra Tinggi (di atas 800kV).

2.2.4 Gardu Induk

Tegangan yang dibangkitkan oleh generator harus dinaikan dengan trafo daya *step up* hingga ratusan kilovolt, yang bertujuan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi, sehingga rugi-rugi daya dapat

dikurangi. Sehingga semua peralatan yang terpasang sesudah trafo (sisi sekunder) harus mampu memikul tegangan yang tinggi. Tegangan pada saluran transmisi dapat mencapai puluhan sampai ratusan kilovolt. Sehingga diantara transmisi dan konsumen dibutuhkan trafo daya *step down*. Trafo-trafo daya ini bersama perlengkapan-perengkapannya disebut gardu induk.

Dari penjelasan diatas gardu induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik dari tegangan rendah ke tegangan tinggi gardu induk *step up*, sebaliknya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah gardu induk *step down*. Disamping itu gardu induk juga dapat digunakan untuk pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan sistem tenaga listrik.

2.2.5 Jenis Gardu Induk

Berdasarkan penempatan instalasi peralatan pada gardu induk dapat dibedakan menjadi 4 macam yaitu :

1. Gardu Induk Pasang Luar (*Outdoor Substation*)

Gardu induk pasang pasang luar yaitu terdiri dari peralatan tegangan tinggi yang terpasang diluar gedung atau bangunan. Walaupun ada beberapa peralatan lain yang berada didalam gedung, seperti peralatan panel kontrol, meja penghubung (*switch board*) dan baterai. Gardu induk jenis ini memerlukan lahan yang luas, namun biaya konstruksinya lebih murah.



Gambar 2.2 Gardu Induk Pasang Luar

Sumber: <https://bit.ly/2sh0kyG>, diakses pada 27 Mei 2018

2. Gardu Induk Pasang Dalam (*Indoor Substation*)

Gardun induk pasang dalam dikarenakan sebagian besar peralatannya berada didalam suatu bangunan. Peralatan ini seperti pada gardu induk pasang luar. Dari transformator utama, rangkaian switchgear dan panel kontrol serta baterai. Jenis pasang dalam ini dipakai untuk menjaga keselarasan dengan daerah sekitarnya, untuk menghindari bahaya kebakaran dan gangguan suara.



Gambar 2.3 Gardu Induk Pasang Dalam

Sumber: <https://bit.ly/2KYAeIx>, diakses pada 28 Mei 2018

3. Gardu Induk Setengah Pasang Luar (*Semi Outdoor Substation*)

Gardu induk setengah pasang luar yaitu sebagian dari peralatan tenaga tinggi terpasang didalam gedung dan yang lainnya dipasang diluar dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi lingkungan. Karena konstruksi yang berimbang antara pasang dalam dengan pasang luar inilah tipe gardu induk yang disebut juga gardu induk semi pasang dalam.



Gambar 2.4 Gardu Induk Setengah pasang Luar

Sumber: <https://bit.ly/2kuhMMq>, diakses pada 28 Mei 2018

4. Gardu Induk Pasang Bawah Tanah (*Underground Substation*)

Gardu induk pasang bawah tanah yaitu hampir semua peralatannya terpasang dalam bangunan bawah tanah. Hanya alat pendinginan biasanya berada di atas tanah, dan peralatan-peralatan yang tidak memungkinkan untuk ditempatkan di bangunan bawah tanah. Gardu induk ini biasanya digunakan dalam bagian kota yang sangat ramai, dan dijalan-jalan dengan gedung bertingkat tinggi. Kebanyakan gardu induk ini dibangun dibawah jalan raya.



Gambar 2.5 Gardu Induk Pasang Bawah Tanah

Sumber: <https://goo.gl/images/eCRw5T>, diakses pada 28 Mei 2018

Berdasarkan tensinya, gardu induk dapat dibedakan menjadi 2 macam yaitu :

1. Gardu Induk Transmisi

Gardu induk transmisi adalah gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industry, kota, dan sebagainya). Gardu induk transmisi yang ada di PLN yaitu tegangan tinggi 150 kV dan tegangan 70 kV.

2. Gardu Induk Distribusi

Gardu induk distribusi adalah gardu induk yang menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menurunkan tensinya melalui transformator tenaga menjadi tegangan menengah (20 kV, 12 Kv atau 6 Kv) untuk kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (127/220 V) atau (220/380 V) sesuai dengan kebutuhan.

2.2.6 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara daya besar (*bulk power source*, BPS) dan peralatan hubung pelanggan (*customers service switches*). Selain itu, suatu sistem distribusi biasanya tersusun atas beberapa peralatan maupun komponen pendukung lainnya seperti gardu induk distribusi, sistem sub-transmisi, feeder dan trafo distribusi, maupun layanan pelanggan.

Pada penyaluran sistem distribusi hendaknya sangat memperhatikan kualitas pelayanan yang terpadu dan memadai. Faktor yang dapat menentukan kualitas pelayanan tersebut yaitu seperti kemampuan sistem distribusi dalam menyalurkan energi listrik kepada pelanggan secara kontinu, dengan tingkat frekuensi gangguan seminimal mungkin. Adapun kontinuitas penyaluran sistem distribusi erat kaitannya dengan konfigurasi jaringan, serta komponen tegangan menengah yang terpasang pada jaringan. Disamping itu, agar fungsi jaringan distribusi dapat berjalan dengan baik maka diperlukan upaya untuk

menanggulangi gangguan yang sering terjadi pada jaringan distribusi dengan cepat, efisien, dan dalam waktu yang singkat. Maka unsur tersebut dapat berpengaruh terhadap tingkat keandalan sistem distribusi dalam menyalurkan tenaga listrik yang berkualitas.

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik dibedakan menjadi 2 sistem yaitu sistem jaringan distribusi primer (jaringan distribusi tegangan menengah) dan sistem jaringan distribusi sekunder (jaringan distribusi tegangan rendah). Dari kedua sistem distribusi tersebut dibedakan berdasarkan tegangan kerjanya. Pada umumnya tegangan kerja pada sistem distribusi primer adalah 6 KV atau 20 KV, sedangkan tegangan kerja pada sistem distribusi sekunder 380 V atau 220 V.

2.2.6.1 Sistem Jaringan Distribusi Primer

Jaringan Distribusi Primer merupakan suatu jaringan yang terletak sebelum gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan menengah. Pada sistem ini menggunakan saluran penghantar tiga fasa dengan jumlah tiga hingga empat kawat. Hantaran yang digunakan dapat berupa kabel dalam tanah atau kawat udara yang menghubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung (sisi primer gardu distribusi).

Tegangan pada sistem distribusi primer diperoleh dari proses menurunkan level tegangan dari tingkat tegangan transmisi. Langkah pertama dilakukan di gardu induk (GI), dimana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah dari tegangan 500 kV menjadi 150 kV, penurunan ini bisa juga dari level 500 kV menjadi 70 kV. Tegangan yang sudah diturunkan di gardu induk selanjutnya diturunkan kembali dari tegangan 150 kV menjadi 20 kV atau dari tegangan 70 kV menjadi 20 kV. Berdasarkan pada konstruksi sistem penyaluran, suatu sistem distribusi primer dibedakan menjadi tiga jenis antara lain sebagai berikut :

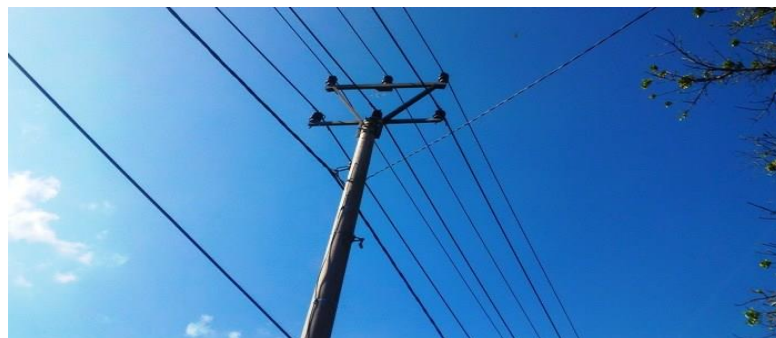
1. SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)

Level tegangan yang digunakan pada SUTM berkisar antara 6 kV sampai 20 kV, dengan ciri utama saluran menggunakan penghantar telanjang dengan penompang berupa isolator yang dipasang pada tiang

beton/besi. Adapun tipe penghantar yang digunakan yaitu kabel telanjang (tidak berisolasi). Penggunaan kawat penghantar telanjang ini harus diperhatikan jarak aman minimum yang harus dipenuhi pada penghantar bertegangan 20 kV tersebut baik antar fase, fase dengan bangunan, fase dengan tanaman dan jangkauan manusia. Kekurangan penghantar telanjang yaitu tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh, sehingga beresiko terjadi gangguan akibat sentuhan pepohonan. Berikut ini adalah ketentuan jarak aman pada SUTM.

Tabel 2.1 Jarak Aman SUTM

No	Uraian	Jarak Aman
1	Terhadap Permukaan Jalan Raya	≥ 6 meter
2	Balkon Rumah	$\geq 2,5$ meter
3	Atap Rumah	≥ 2 meter
4	Dinding Bangunan	$\geq 2,5$ meter
5	Antenna TV/Radio, Menara	$\geq 2,5$ meter
6	Pohon	$\geq 2,5$ meter
7	Lintasan Kereta Api	≥ 2 meter dari atap kereta
8	Lintasan Jaringan Listrik Sangat Rendah	Kabel Tanah
9	Under Build TM-TM	≥ 1 meter
10	Under Build TM-TR	≥ 1 meter



Gambar 2.6 Saluran Udara Tegangan Menengah

Sumber: <https://bit.ly/2si3a6s>, diakses pada 28 Mei 2018

2. SKUTM (Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah)

Pada tegangan kerja saluran SKUTM berkisar antara 6 kV sampai 20 kV. Penghantar yang digunakan pada saluran ini adalah penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Namun total beban penghantar yang dipilin dan dibentangkan diudara harus diperhitungkan dengan baik karena akan berpengaruh terhadap kemampuan tiang beron/besi dalam menompang penghantar tersebut. Selain itu, jarak aman dari SKUTM yang menggunakan kabel berpilin yakni minimal 60 cm, dengan ketentuan kabel terbebas dari objek saeperti bangunan, dan pepohonan. Adapun pertimbangan dari pemilihan saluran jenis ini adalah harga yang relative mahal karena kabel cukup berat sehingga pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton/besi penompangnya harus kuat.



Gambar 2.7 Kabel Udara Tegangan Menengah

Sumber: <https://goo.gl/images/MPdXQN>, diakses pada 28 Mei 2018

3. SKTM (Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah)

Saluran kabel tanah tegangan menengah berkerja pada level tegangan 6 kV sampai 20 kV, penghantar yang digunakan sudah dilengkapi oleh pelindung isolasi penghantar per fase dan dilindungi oleh pelindung mekanis. Seperti namanya saluran ini ditanam dibawah tanah sehingga apabila terjadi gangguan, maka sulit untuk melakukan perbaikan. Adapun biaya investasi untuk saluran ini lebih mahal dibandingkan dengan saluran yang lain, tetapi konstruksi dari saluran kabel tanah dinilai memiliki tingkat keamanan serta keandalan yang lebih baik dalam penyaluran energi

listrik untuk level tegangan menengah. Oleh karena itu, penerapan SKTM sebagai jaringan utama merupakan bentuk usaha untuk meningkatkan kualitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan.



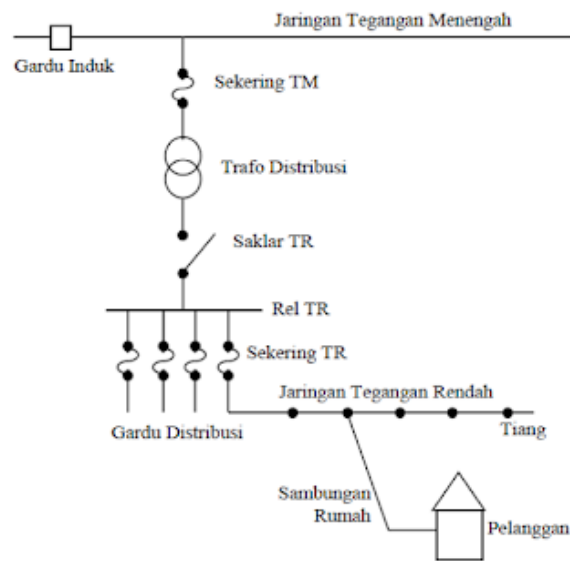
Gambar 2.8 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah

Sumber: <https://bit.ly/2LOWjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

2.2.6.2 Sistem Jaringan Distribusi Sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder biasanya juga dinamakan dengan jaringan distribusi tegangan rendah yaitu jaringan yang meneruskan penyaluran energi listrik dari gardu induk pembagi/distribusi menuju pusat beban/konsumen. Pada jaringan distribusi tegangan rendah tegangan diturunkan dari 20 kV menjadi tegangan rendah yaitu 380 V/ 220 V. Standar jaringan distribusi tegangan rendah yakni 127 V/220 V pada sistem terdahulu, 380 V/ 220 V pada sistem terbaru, dan untuk industri kebutuhan industrial 440 V/ 550 V.

Jaringan ini terletak antara sistem distribusi primer dan beban. Komponen utama dari sistem distribusi sekunder diantaranya yaitu trafo distribusi yang digunakan sebagai penurun tegangan (*step-down*), untuk sekunder (*secondary main*), pelayanan konsumen (*service drops*), dan peralatan kWh meter yang digunakan untuk mengukur konsumsi energi listrik pada pelanggan. Berikut ini merupakan gambar diagram garis sistem distribusi sekunder.



Gambar 2.9 Hubungan Jaringan Tegangan Menengah dan Tegangan Rendah Hingga Menuju Konsumen

Sumber: <https://bit.ly/2L0WjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

Posisi jaringan distribusi sekunder yang langsung terhubung langsung kepada pelanggan/konsumen, maka kenadalan jaringan distribusi tentu sangat penting agar dapat menekan angka pemadaman terhadap pelanggan. Pada umumnya *drop voltage* sistem distribusi terjadi pada *feeder* jaringan tegangan menengah dan tegangan rendah, trafo distribusi, sambungan rumah, serta instalasi rumah. *Drop voltage* merupakan selisih nilai tegangan antara tegangan yang diterima dengan tegangan yang dikirim disebabkan adanya pengaruh impedansi penghantar. Oleh karena itu pemilihan ukuran luas permukaan penghantar pada jaringan tegangan menengah harus diperhitungkan dengan baik agar dapat meminimalisir terjadinya jatuh tegangan (*drop voltage*). Pada sistem distribusi sekunder dibedakan menjadi dua jenis, yaitu :

1. SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah)

Saluran udara tegangan rendah merupakan titik terakhir dari sistem tegangan listrik yang bertugas untuk menyalurkan energi listrik kepada konsumen dengan tegangan operasi yaitu 380 V/ 220 V. Saluran udara

tegangan menengah ini menurut konstruksi salurannya menggunakan tiang penyangga yang biasanya berupa beton untuk menompang kabel penghantar dengan tipe kawat berisolasi yang dipilin.

2. SKTR (Saluran Kabel Tegangan Rendah)

Sama halnya pada saluran kabel tegangan rendah juga merupakan titik terakhir dalam menyalurkan energi listrik kepada konsumen dengan menurunkan level tegangan menjadi 380 V/ 220 V. Hal yang membedakan antara SUTR dengan SKTR yaitu kabel penghantar pada SKTR ditanam di dalam tanah, oleh karena itu jika memakai SUTR dari aspek jarak aman tidak bermasalah dikarenakan SUTR menggunakan kabel berisolasi. Faktor penggunaan SKTR yaitu karena mempertimbangkan sistem transmisi tegangan menengah yang ada (contohnya pada pemukiman yang padat dengan bangunan sehingga harus memakai sistem SKTM), serta dilihat dari unsur estetika sistem SKTM lebih bagus dipandang.

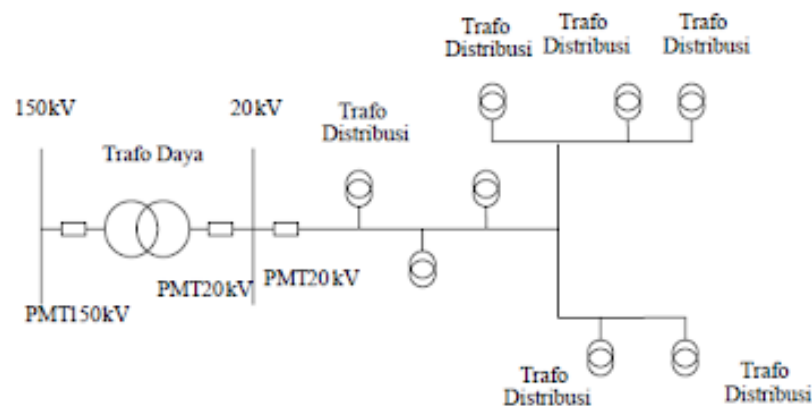
2.2.7 Konfigurasi Jaringan Distribusi

Pada umumnya dapat dikatakan bahwa suatu wilayah memiliki kebutuhan beban energi listrik yang semakin besar dan kompleks beban yang dilayani pada suatu kawasan/daerah. Hal ini berbanding lurus dengan semakin banyaknya penyulang yang dibutuhkan pada setiap wilayah tersebut. Beberapa penyulang berkumpul disuatu titik yang disebut Gardu Hubung (GH). Gardu Hubung adalah suatu instalasi peralatan listrik yang berfungsi sebagai titik pengumpulan dari satu atau lebih sumber dan penyulang dan tempat pengalihan (*transfer*) beban apabila terjadi gangguan pada salah satu jaringan yang dilayani. Dari gabungan beberapa penyulang dapat membentuk beberapa tipe konfigurasi jaringan pada sistem distribusi primer. Berikut ini adalah beberapa sistem konfigurasi tersebut :

1. Sistem Jaringan Distribusi Radial

Dinamakan jaringan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari satu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabang

ke titik-titik beban. Kontruksi sistem jaringan distribusi radial tergolong paling sederhana dibanding dengan kontruksi jenis lainnya. Sistem ini banyak digunakan pada daerah/wilayah perkotaan maupun pedesaan yang tidak menuntut keandalan dalam tingkat yang tinggi. Tetapi pada sistem jaringan distribusi radial memiliki kekurangan yaitu apabila terjadi gangguan pada sumber ataupun penyulang maka penyaluran energi listrik kepada seluruh konsumen di jaringan ini akan terputus (tidak ada *backup* dari sumber lain). Berikut adalah gambar diagram garis dari sistem jaringan distribusi radial.



Gambar 2.10 Sistem Jaringan Distribusi Radial

Sumber: <https://bit.ly/2LOWjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

Tingkat keandalan sistem jaringan distribusi radial lebih rendah dibandingkan dengan sistem lainnya, kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama mengalami gangguan maka seluruh gardu akan ikut padam.

Pada sistem jaringan distribusi radial nilai arus terbesar mengalir di jaringan hawa yang terdekat pada GI, hal tersebut dikarenakan catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabanga-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir disepanjang saluran menjadi tidak sama sehingga luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak sama. Sehingga saluran yang terdekat dengan

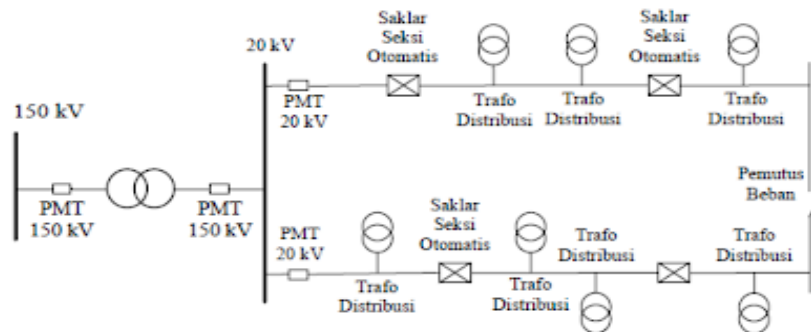
gardu induk ukuran penampangnya relative lebih besar dan saluran cabang semakin keujung maka semakin kecil ukuran penampang konduktornya karena arus beban yang mengalir lebih kecil pula. Pada jaringan distribusi radial ini mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

- a. Biayanya relatif murah.
- b. Bentuknya sederhana.
- c. Kualitas pelayanan dayanya relatif kurang baik, dikarenakan rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
- d. Dari sistem keandalan pelayanan nya kurang baik sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami pemadaman total.

Untuk mengatasi gangguan pada jaringan radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pemaman, yang berfungsi untuk membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

2. Sistem Jaringan Distribusi Loop

Disebut sistem distribusi *loop* karena kontruksi jaringan nya yang membentuk suatu rangkain tertutup. Jika ditinjau dari kontruksinya sistem ini merupakan gabungan dari dua buah sistem *radial*. Oleh karena itu, sistem *loop* memiliki lebih dari satu sumber dan penyulang sehingga penyaluran energi listrik menuju pusat-pusat beban menjadi lebih terjamin, dikarenakan *voltage drop* dan *losses* yang terjadi di jaringan tidak sebesar seperti sistem *radial*. Berikut ini adalah gambar konfigurasi pada sistem jaringan distribusi *loop*.



Gambar 2.11 sistem jaringan distribusi *loop*

Sumber: <https://bit.ly/2L0WjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

Dapat dilihat pada gambar konfigurasi diatas susunan rangkaian penyulang membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang dan dimana pada ujung dari dua buah jaringan dipasang sebuah pemutus (PMT) dan pemisah (PMS). Sehingga pada saat terjadi gangguan, setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliaran daya listrik kebagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti atau padam. Oleh karena itu keandalan aliran energi listrik akan lebih terjamin, karena rugi daya dan drop tegangan akan lebih trejamin.

Sistem jaringan distribusi *loop* digunakan pada keandalan jaringan distribusi 20 kV di karenakan konfigurasi jaringan distribusi *loop* memiliki pengaruh pada durasi waktu pemadaman yang lebih singkat dibandingkan dengan sistem jaringan distribusi radial apabila terjadinya gangguan yang mengakibatkan pemadaman listrik.

Terdapat 2 macam bentuk sistem jaringan distribusi *loop* yaitu:

- a. Bentuk *open loop*, dengan kondisi normalnya rangkain selalu terbuka, dan di salah satu bagian antara gardu distribusi dipasang *normally open switch*.
- b. Pada jaringan berbentuk *close loop*, kondisi normalnya dari jaringan adalah tertutup, dan pada bentuk ini disalah satu bagian antara gardu distribusi dipasang *normally close switch*.

Jaringan distribusi *loop* mempunyai kualitas dan kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih mahal dan cocok digunakan pada daerah yang padat pemukiman dan memerlukan keandalan tinggi.

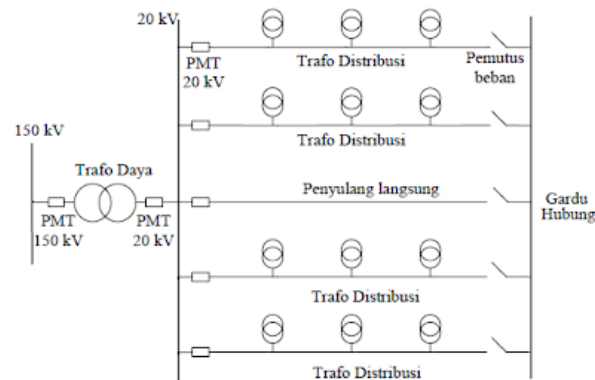
3. Sistem Jaringan Distribusi Spindel

Sistem jaringan distribusi spindel yaitu sistem distribusi yang berasal dari perpaduan sistem distribusi *loop* dan *radial* yang kemudian dikembangkan lebih lanjut. Sistem distribusi *spindel* pada umumnya memiliki beberapa penyulang aktif serta penyulang cadangan (*express*). Pada sistem *spindel* keluaran saluran dari gardu induk terlebih dahulu diarahkan menuju gardu hubung, selanjutnya dari gardu hubung barulah diteruskan menuju salah satu saluran yang disebut *express* penyulang. *Express* penyulang berfungsi sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu penyulang yang berkerja, juga dapat berfungsi untuk memper kecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan normal, dan sebagai titik manuver ketika terjadi gangguan pada jaringan tersebut. Dalam keadaan normal memang *express* penyulang sengaja dioperasikan tanpa beban.

Sistem jaringan distribusi spindel tergolong sistem yang handal, karena dalam pembangunannya sistem ini sudah memperhitungkan perkembangan beban atau penambahan jumlah konsumen sampai beberapa tahun kedepan, sehingga dapat digunakan dalam waktu yang cukup lama. Akan tetapi biaya investasi pembangunannya juga lebih besar dan mahal.

Pola jaringan distribusi spindel biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM) yang sangat cocok diterapkan di kota-kota besar

Berikut adalah gambar diagram garis konfigurasi jaringan distribusi dengan jenis jaringan distribusi spindel.



Gambar 2.12 Konfigurasi Sistem Jaringan Distribusi Spindel

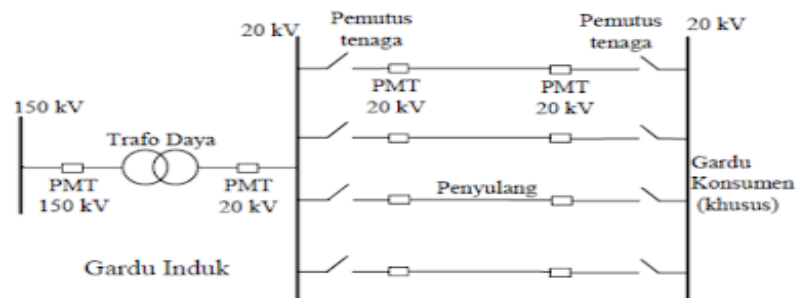
Sumber: <https://bit.ly/2LOWjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

Sistem jaringan distribusi spindel digunakan pada keadaan jaringan distribusi 20 kV yaitu apabila beban penyulang pada sistem jaringan distribusi *loop* sudah hampir memenuhi batas maksimum. Oleh karena itu sistem jaringan spindel memiliki keandalan yang baik dibandingkan dengan sistem jaringan *loop* apabila beban pada sistem jaringan *loop* sudah hampir memenuhi batas maksimum dan sistem jaringan distribusi spindel memiliki backup penyulang *express* sehingga tidak perlu menggunakan bantuan penyulang lain.

4. Sistem Jaringan Distribusi *Tie Line*

Sistem jaringan distribusi *tie line* atau dapat disebut juga sistem hantar hubung seperti halnya pada sistem *loop*. Sistem jaringan distribusi *tie line* sendiri hanya digunakan oleh pelanggan khusus yang mewajibkan penyaluran energi listrik tidak boleh padam/terputus, contohnya yaitu Bandar udara, rumah sakit, dan sebagainya. Sistem *tie line* juga memiliki persyaratan konstruksi yaitu paling tidak tersedia dua buah penyulang yang terpasang peralatan berupa *Automatic Treansfer Switch*, atau *Automatic Change Over Switch*, dengan setiap penyulang terhubung kepada gardu pelanggan khusus tersebut. Hal ini bertujuan apabila terjadi gangguan pada salah satu penyulang, maka penyaluran energi listrik dapat digantikan oleh

penyulang lainnya dalam waktu yang sangat cepat, sehingga lamanya waktu gangguan dapat ditekan serendah mungkin. Oleh karena itu sistem ini terbilang sangat handal, akan tetapi hanya digunakan oleh pelanggan khusus saja. Berikut gambar konfigurasi sistem jaringan distribusi *tie line*.

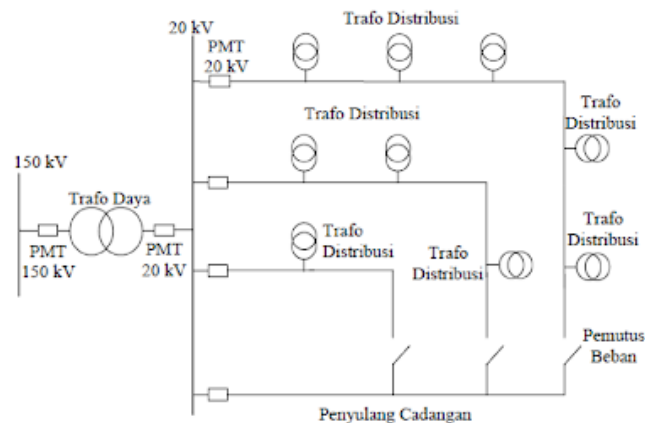


Gambar 2.13 Konfigurasi Sistem Jaringan *Tie Line*

Sumber: <https://bit.ly/2LOWjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

5. Sistem Jaringan Distribusi *Mesh*

Sistem jaringan distribusi *mesh* atau dapat juga disebut sistem gugus/*kluster* yaitu merupakan perkembangan lebih lanjut dari sistem *spindel*. Sistem *mesh* memiliki mutu dan keandalan penyaluran yang lebih baik serta dapat mengikuti pertumbuhan beban jika dibandingkan dengan sistem distribusi *loop* ataupun *radial*, oleh sebab itu sistem jaringan distribusi *mesh* umumnya lebih banyak digunakan pada area perkotaan yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem *mesh* ini terdapat saklar pemutus beban, dan penyulang cadangan. Dimana penyulang cadangan ini berfungsi bila terjadi gangguan pada salah satu penyulang maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen. Berikut gambar konfigurasi sistem jaringan distribusi *mesh*.



Gambar 2.14 Sistem Jaringan Distribusi *Mesh*

Sumber: <https://bit.ly/2L0WjWE>, diakses pada 28 Mei 2018

Sistem jaringan distribusi *mesh* sebenarnya hampir sama dengan sistem jaringan distribusi spindel yaitu sama-sama memiliki penyulang *express*, akan tetapi perbedaan jaringan *mesh* dengan spindel yaitu pada lokasi penggunaannya karena jaringan *mesh* jarak *express* penyulang lebih dekat dengan gardu induk, oleh karena itu sistem jaringan distribusi *mesh* terbilang handal jika dipergunakan pada perkotaan yang padat.

2.2.8 Gangguan Sistem Distribusi

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik sering terjadi gangguan-gangguan seperti faktor alam, kelaian manusia, dan usia peralatan yang terlalu lama sehingga tidak mampu melakukan proses penyaluran energi listrik dan pengamanan. Gangguan pada sistem distribusi adalah terganggunya sistem tenaga listrik yang menyebabkan relay pengaman berkerja untuk membuka *circuit breaker* di gardu induk yang menyebabkan terputusnya suplai energi listrik sehingga terjadi pemadaman listrik pada konsumen. Fungsi peralatan pengaman yaitu mengamankan peralatan yang dilalui arus gangguan tersebut untuk menghindari kerusakan pada peralatan pengaman dan meniadakan gangguan. Gangguan yang sering terjadi pada jaringan distribusi yaitu pada saluran distribusi yang dibentangkan di udara bebas (SUTM) yang umumnya tidak memakai isolasi

dibandingkan dengan saluran distribusi yang ditanam didalam tanah (SKTM) dengan menggunakan isolasi pembungkus.

Sumber gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi dapat berasal dari dalam sistem maupun gangguan dari luar sistem. Gangguan dari dalam sistem seperti (tegangan lebih, arus lebih, pemasangan yang kurang tepat, dan usia peralatan atau komponen), sedangkan gangguan dari luar sistem anatra lain seperti (ranting pohon yang mengenai SUTM, sabaran petir, hujan atau cuaca, dan kerusakan pada peralatan karena binatang).

Gangguan sistem distribusi tenaga listrik dapat mengakibatkan terputusnya aliran listrik pada penyaluran energi listrik ke pelanggan. Saluran energi listrik yang terputus dapat menyebabkan kerugian pada pelanggan, terutama pelanggan yang menggunakan daya besar dan pada PLN itu sendiri. Gangguan pada sistem distribusi dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu :

1. Gangguan yang bersifat temporer

Merupakan gangguan sesaat, dimana gangguan akan hilang dengan sendirinya atau dengan pemutusan sesaat aliran listrik pada bagian yang mengalami gangguan dari sumber tegangan.

2. Gangguan yang bersifat permanen

Merupakan gangguan tetap (permanen) yang apabila terjadi gangguan, maka memerlukan tindakan perbaikan untuk menghilangkan penyebab gangguan tersebut, sehingga gangguan ini menyebabkan pemutusan tetap.

2.2.9 Sistem Proteksi Jaringan Distribusi

Sistem proteksi tenaga listrik dapat diartikan sebagai sistem pengamanan yang terpasang pada sistem transmisi, distribusi, transformator tenaga, serta terpasang pula pada generator listrik, yang mana sistem proteksi ini bertujuan dalam membatasi zona yang mengalami gangguan dengan zona yang tidak mengalami gangguan agar sistem penyaluran tenaga listrik tetap dapat bekerja. Jadi pada dasarnya sistem proteksi berguna untuk melakukan pengamanan

mencakup seluruh sistem tenaga listrik serta menjaga mutu pelayanan dan keandalan penyaluran energi listrik hingga kepada konsumen.

Oleh karena itu, untuk menjaga mutu serta keandalan suatu sistem penyaluran distribusi secara berkesinambungan maka diperlukan suatu sistem proteksi untuk mengatasi berbagai macam jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem penyaluran distribusi. Sistem proteksi pada jaringan distribusi diharapkan memiliki kinerja dan koordinasi yang baik dalam mendeteksi maupun mengisolir gangguan yang terjadi (bersifat temporer dan permanen) agar peralatan yang terpasang pada jaringan distribusi terhindar dari kerusakan serta tidak diperlukan pemadaman listrik kepada konsumen. Berikut beberapa jenis sistem proteksi yang biasa terpasang pada sistem jaringan distribusi listrik.

1. *Recloser* (Penutup Balik Otomatis)

Recloser (peneutup balik otomatis) yaitu suatu alat pengaman arus lebih yang diatur dengan waktu untuk melakukan pemutusan dan menutup kembali secara otomatis, terutama untuk membebaskan dari gangguan yang bersifat temporer (sementara). Pada *recloser* dilengkapi sarana indikasi seperti arus lebih, pengaturan waktu operasi, serta penutupan kembali secara otomatis. Desain dari *recloser* memungkinkan untuk dapat membuka kontak-kontaknya secara tetap dan terkunci, sesuai dengan pemrogramannya setelah melalui beberapa kali operasi buka-tutup. Prinsip kerja dari *recloser* yaitu apabila gangguan bersifat sementara maka *recloser* akan membuka dan menutup kembali apabila gangguan telah hilang, jika gangguan bersifat permanen maka *recloser* akan membuka kontak-kontaknya secara tetap dan terkunci/*lock out*. Apabila gangguan telah dihilangkan maka *recloser* dapat ditutup kembali.

Oleh karena itu sistem proteksi jenis *recloser* sangat berperan penting pada sistem keandalan jaringan distribusi untuk mengamankan peralatan utama yang terpasang pada jaringan distribusi seperti trafo distribusi dari gangguan arus hubung singkat. Sehingga apabila terjadi gangguan arus hubung singkat *recloser* bekerja memutus arus gangguan agar tidak

menyebabkan kerusakan fatal pada perangkat utama yang dapat menyebabkan pemadaman listrik dengan waktu yang lama, akan tetapi apabila gangguan bersifat temporer maka sistem proteksi *recloser* bekerja sesuai *timer* yang telah diseting sehingga gangguan tidak sempat masuk ke komponen utama dan pemadaman terjadi tidak memakan waktu lama. Dan *recloser* ditempatkan pada titik yang memiliki indeks kegagalan minimum SAIFI.

2. Pemisah (PMS)

Pemisah (PMS) atau dapat disebut sebagai *Disconnecting Switch* (DS). Namun demi keselamatan dan keamanan kerja pengoperasian pemisah (PMS) harus dapat terlihat dengan jelas bahwa posisi saklar dalam keadaan terbuka atau tertutup. Pemisah (PMS) hanya mampu memutuskan arus magnetisasi transformator (arus yang mengalir dalam keadaan tidak berbeban), maka antara bagian yang bertegangan dan yang tidak bertegangan akan dapat dipisahkan. Adapun pemisah (PMS) biasanya dioperasikan saat dilakukan pemeliharaan rutin jaringan dari pihak PLN.

Dalam pengoperasiannya PMT dan PMS saling bebasan sebagaimana fungsinya pada rangkaian sistem. Jika menghubungkan dari rel (jaringan) menuju beban maka pengoperasian PMS terlebih dulu dilakukan, selanjutnya barulah menyusul pengoperasian PMT. Hal yang sama juga berlaku sebaliknya, jika melepaskan dari rel (jaringan) menuju beban maka terlebih dahulu PMT dioperasikan (mematikan/ kondisi *off*), barulah selanjutnya PMT dioperasikan (dimatikan/kondisi *off*). Susunan pengoperasian tersebut tidak boleh tertukar karena dapat menyebabkan PMT terbakar mengingat PMT memutuskan jaringan saat keadaan tidak berbeban.

Pengaruh sistem proteksi pemisah (PMS) dengan keandalan jaringan distribusi yaitu sebagai pemutus arus pada saat tidak berbeban yang dioperasikan ketika pemeliharaan jaringan distribusi ataupun jaringan transmisi yang bertujuan untuk meningkatkan keandalan jaringan

distribusi maupun jaringan transmisi. PMS juga berperan sebagai pengalihan jalur suplai energi listrik ke pelanggan pada saat pemeliharaan dilakukan, oleh karena itu pada saat pemeliharaan tidak perlu dilakukan pemadaman listrik.

3. Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus tegangan (PMT) atau bisa disebut juga *Circuit Breaker* (CB) adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk melakukan *switching* sekali atau beberapa kali pada berbagai bagian rangkaian listrik baik dalam kondisi normal maupun abnormal. Waktu antara *tripping coil* mulai *deenergized* sampai kontak CB bergerak disebut buka (*opening time*). Setelah itu waktu antara kontak CB bergerak sampai busur api padam disebut waktu busur api (*arcing time*). Dan jumlah waktu antara *tripping coil* mulai *de-energized* sampai busur api padam disebut total waktu buka (*total break time*).

Pada saat terjadi gangguan waktu yang memutus atau menghubungkan arus beban dan arus gangguan akan terjadi Tegangan *Recovery* yaitu suatu fenomena tegangan lebih dan busur api yang terjadi saat pemutusan arus beban atau gangguan yang disebabkan nilai *power factor* dari arus beban. Hal ini sangat mempengaruhi kemampuan meng-*clear*-kan dengan baik dari PMT.

Pengaruh sistem proteksi jenis PMT dengan keandalan jaringan distribusi yaitu mampu memutuskan arus gangguan yang besar sehingga arus gangguan tidak merusak komponen utama pada sistem distribusi yang mengakibatkan pemadaman listrik.

4. Saklar Beban (SB)

Saklar beban (SB) merupakan peralatan proteksi berupa *switch*/saklar yang bertugas untuk membatasi zona yang mengalami gangguan, serta dapat juga menjadi penghubung antara penyulang saat kondisi darurat yang menggunakan sistem jaringan *loop*. SB pada umumnya dipasang

diatas tiang jaringan dengan tuas penggeraknya terletak dibawah dan juga dapat digunakan pada jaringan yang lokasinya berdekatan dengan pusat beban.

Pengaruh sistem proteksi saklar beban (SB) pada kenadalan jaringan distribusi yaitu apabila terjadi gangguan pada salah satu penyulang pada konfigurasi *loop* maka gangguan tidak mengakibatkan menyeluruh dikarenakan SB membatasi zona yang mengalami gangguan, oleh karena itu pemadaman terjadi tidak menyeluruh.

5. Saklar Seksi Otomatis (SSO)

Saklar Seksi Otomatis (SSO) merupakan peralatan proteksi yang bertugas untuk memutus rangkain jaringan agar jaringan utama dapat dipisahkan menjadi beberapa seksi otomatis. Hal tersebut bertujuan agar zona terjadinya gangguan permanen dapat dilokalisir sekecil-kecilnya. Adapun penerapan Saklar Seksi Otomatis (SSO) biasanya dipasang di jaringan distribusi 20kV tipe AVS. *Automatic Vaccum Switch/AVS* akan terbuka ketika kondisi rangkaian tanpa tegangan, namun jika rangkaian dalam kondisi dialiri tegangan maka rangkaian harus dapat ditutup oleh AVS saat kondisi hubung singkat. Selain itu, AVS dapat dioperasikan untuk membuka rangkaian saat kondisi berbeban, dengan prinsip kerjanya berdasarkan pada pendeteksian tegangan.

Pengaruh sistem proteksi jenis saklar seksi otomatis (SSO) pada keandalan jaringan distribusi yaitu untuk membatasi zona terjadinya gangguan permanen yang menyebabkan pemadaman listrik sehingga dapat dilokalisir seminimal mungkin, SSO pada umumnya digunakan pada jaringan distribusi 20 kV tipe AVS.

6. *Fuse Cut Out* (FCO/Pelebur)

Fuse Cut Out (FCO) atau dapat juga disebut dengan pelebur merupakan perpaduan dari peralatan pelindung dengan pemutus rangkaian. FCO pada dasarnya dapat melebur (*expulsion*) karena dilengkapi dengan

fuse link untuk mengamankan jaringan apabila terdapat arus lebih yang mengalir. Dengan menghitung jumlah arus (beban) maksimal yang mampu dialirkan pada jaringan yang diamankan maka dapat ditentukan besar *fuse link* yang dibutuhkan.

Adapun karakteristik FCO berdasarkan pada prinsip *thermal* ($I^2.t$), dimana saat gangguan hubung singkat atau beban lebih yang terjadi dapat menyebabkan *fuse* langsung melebur karena dialiri arus melebihi nilai Kemampuan Hantar Arus nya. Selain itu, ketika elemen lebur terputus maka dapat menimbulkan loncatan bunga api yang melalui batang lebur, oleh sebab itu hendaknya pada batang atau anak pelebur dilengkapi dengan pasir silika untuk memadamkan loncatan bunga api yang terjadi.

Pengaruh FCO pada keandalan jaringan distribusi yaitu apabila terjadi gangguan arus hubung singkat atau beban lebih FCO berfungsi memutuskan jaringan listrik agar gangguan tidak merusak komponen utama, setelah gangguan terjadi FCO harus diganti dengan FCO yang baru, akan tetapi tidak membutuhkan waktu yang lama pada saat penggantian. Sedangkan letak dari FCO sendiri biasanya terletak dibagian percabangan penyulang.

7. *Arrester*

Arrester merupakan suatu alat pengaman bagi peralatan listrik terhadap gangguan tegangan lebih yang disebabkan oleh petir. Alat ini berfungsi untuk meneruskan arus petir ke sistem pentanahan sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang merusak aliran daya sistem frekuensi 50 Hz. Agar tidak mengganggu aliran sistem, maka pada saat terjadi gangguan *arrester* berfungsi sebagai konduktor yang mempunyai tahanan rendah. Akibatnya *arrester* dapat meneruskan arus yang tinggi ke tanah untuk dinetralisir dan setelah gangguan hilang, *arrester* kembali berfungsi normal sebagai isolator. Pada umumnya *arrester* dipasang pada jaringan, transformator distribusi, *cubicle*, dan Gardu Induk.

Pengaruh sistem proteksi jenis *arrester* pada keandalan jaringan distribusi yaitu untuk menanggulangi dari gangguan seperti sambaran

petir, sehingga gangguan petir dapat langsung diteruskan ke bumi oleh *arrester* dan tidak sempat menyebabkan kerusakan pada komponen penting didalam sistem jaringan distribusi. Sehingga dengan adanya *arrester* gangguan petir yang dapat menyebabkan rusaknya suatu komponen yang menyebabkan pemadaman listrik dan berdampak dengan keandalan jaringan distribusi dapat diminimalisir.

2.2.10 Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem distribusi adalah suatu ukuran ketersediaan/tingkat pelayanan tenaga listrik dari sistem pembangkit hingga ke konsumen. Ukuran keandalan dapat dinyatakan seperti lamanya waktu pemadaman, frekuensi terjadinya pemadaman, serta waktu yang diperlukan untuk memulihkan kondisi sistem dari pemadaman (*restoration*). Keandalan juga dapat dikatakan sebagai kemampuan dari jaringan sistem tenaga listrik untuk menyampaikan tidak terputusnya tenaga listrik bagi pelanggan pada satu taraf yang telah ditentukan sesuai mutu dan jaminan keamanannya. Oleh karena itu, sistem keandalan distribusi dapat dikatakan jika tingkat keandalan sistem distribusi berbanding terbalik dengan tingkat pemadaman listrik, yakni semakin rendah tingkat pemadaman aliran listrik terhadap beban yang dilayani, maka tingkat keandalan semakin tinggi, hal ini berlaku untuk sebaliknya. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat keandalan suatu sistem jaringan distribusi, antara lain sebagai berikut.

1. Kontruksi Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah yang memakai saluran udara dengan kabel penghantar yang dilengkapi isolasi tentunya memiliki tingkat keandalan yang lebih baik dibandingkan dengan saluran udara dengan kabel penghantar tipe telanjang (tidak menggunakan isolasi). Hal ini dikarenakan kabel udara dengan tipe telanjang (tidak menggunakan isolasi) memiliki tingkat kemungkinan yang lebih tinggi terhadap gangguan eksternal.

2. Pemilihan Konfigurasi Sistem Distribusi

Pada pemilihan konfigurasi dapat mempengaruhi tingkat keandalan suatu sistem distribusi. Sebagai perbandingan, konfigurasi sistem distribusi dengan tipe *Loop* memiliki keandalan yang lebih baik daripada sistem konfigurasi tipe *Radial* karena pada konfigurasi sistem distribusi tipe *Loop* lebih memungkinkan bagi titik beban dapat dilayani melalui dua arah saluran.

3. Panjang Saluran Distribusi

Pada penggunaan jenis penghantar yang sama dapat berpengaruh terhadap tingkat keandalan jaringan distribusi. Dikarenakan panjang saluran berbanding lurus dengan tingkat gangguan yang terjadi, dimana semakin panjang suatu saluran distribusi maka semakin tinggi pula tingkat gangguan yang dapat terjadi pada saluran. Hal yang sama juga berlaku sebaliknya.

4. Peralatan Proteksi

Penentuan peralatan proteksi yang digunakan pada jaringan distribusi juga perlu dipertimbangkan dengan baik dan perlu memperhatikan aspek ekonomis, dan tentunya kualitas alat proteksi yang digunakan. Sebagai contoh, untuk mengamankan jaringan dari gangguan yang bersifat temporer maka dapat digunakan peralatan pengaman berupa *recloser* dikarenakan *recloser* dapat menutup kembali secara otomatis jika gangguan sudah berhasil diatasi sehingga jaringan distribusi dapat normal kembali. Namun, dikarenakan *recloser* memiliki harga yang relatif mahal, maka umumnya pada titik percabangan antara saluran utama dengan saluran cabang juga dipasang peralatan pengaman berupa FCO/*Fuse Cut Out* atau pelebur yang berfungsi untuk mengamankan jaringan dari gangguan bersifat permanen.

Disamping itu, berdasarkan pada standar IEEE P1366 terdapat pula beberapa aspek yang mempengaruhi keandalan sistem distribusi yaitu:

1. *Interruption of Supply* (Pemadaman) merupakan kondisi terputusnya penyaluran energi listrik terhadap pusat-pusat beban yang dilayani dikarenakan terjadinya gangguan pada jaringan distribusi.
2. *Outage* (Keluar) merupakan kondisi saat suatu peralatan pada jaringan tidak bekerja sebagaimana mestinya yang disebabkan oleh berbagai kejadian yang berkaitan dengan peralatan tersebut. Kondisi ini dinilai dapat, atau tidak dapat mengakibatkan terjadinya pemutusan aliran listrik terhadap konsumen, tergantung dari sistem konfigurasi jaringan distribusi yang diterapkan.
3. *Interruption Duration* (Durasi Pemadaman) merupakan durasi waktu terjadinya pemadaman aliran listrik hingga pemadaman tersebut berakhir.
4. *Outage Duration* (Durasi Keluar) merupakan durasi waktu antara terjadinya kondisi *outage* pada suatu peralatan di jaringan hingga peralatan tersebut dapat kembali bekerja sebagaimana mestinya.
5. *Total Number of Costumer Served* (Total Pelanggan Dilayani) adalah jumlah keseluruhan pelanggan yang dilayani berdasarkan pada periode laporan akhir.
6. Periode Laporan, umumnya satu periode laporan dianggap sebagai satu tahun.

Tingkat kontinuitas mutu pelayanan dari sarana penyaluran tersusun berdasarkan waktu yang dibutuhkan untuk menanggulangi gangguan agar sistem dapat kembali menyalurkan energi listrik menuju pusat-pusat beban (SPLN 52, 1983). Tingkatan-tingkatan tersebut antara lain sebagai berikut.

1. Tingkat 1, kemungkinan pemadaman berlangsung selama berjam- jam, yakni waktu yang dibutuhkan dalam melakukan pencarian serta perbaikan gangguan.
2. Tingkat 2, pemadaman terjadi dalam beberapa jam, yakni waktu yang dibutuhkan dalam mengirimkan petugas menuju zona yang mengalami

gangguan guna melokalisasi kerusakan yang terjadi serta memanipulasi guna menghidupkan sementara melalui saluran lainnya.

3. Tingkat 3, pemadaman terjadi dalam beberapa menit, yakni manipulasi yang dilakukan petugas jaga di gardu atau melakukan pendeteksian serta memanipulasi melalui jarak jauh.
4. Tingkat 4, pemadaman terjadi dalam beberapa detik, yakni memanipulasi dengan otomatis melalui *Distribution Control Center* (DCC).
5. Tingkat 5, tanpa terjadi pemadaman yakni sistem dilengkapi dengan instalasi cadangan yang terpisah dan otomatis melalui *Distribution Control Center*.

2.2.10.1 Pengaruh Perbedaan Kabel Berisolasi dan Kabel Tidak Berisolasi Pada Keandalan Sistem Distribusi

Pada dasarnya sistem jaringan distribusi listrik menggunakan dua jenis pilihan kabel yaitu kabel berisolasi dan kabel telanjang (tidak berisolasi). Masing-masing kabel memiliki kelebihan dan kekurangan untuk menghantarkan arus listrik pada jaringan distribusi. Oleh sebab itu pemilihan jenis kabel dapat berpengaruh pada keandalan sistem distribusi tersebut. Berikut pengaruh kabel berisolasi dan kabel telanjang (tidak berisolasi) pada keandalan sistem distribusi :

1. Kabel Berisolasi

Biasanya jenis kabel berisolasi digunakan pada saluran bawah tanah dan pada gardu induk pasang dalam. Kabel berisolasi memiliki tingkat keandalan yang bagus dikarenakan tidak mudah mengalami gangguan *external* atau cuaca seperti : cuaca buruk, hujan angin, taufan, bahaya petir dan sebagainya. Oleh karena itu penggunaan kabel berisolasi dapat meminimalisir terjadinya kerusakan pada jaringan atau komponen penting lainnya yang menyebabkan padamnya arus listrik pada konsumen. Selain itu penggunaan kabel berisolasi juga dapat melindungi kabel dari sentuhan pohon yang dapat mengakibatkan arus

hubung singkat. Akan tetapi penggunaan kabel berisolasi memerlukan biaya yang mahal dibandingkan dengan kabel telanjang (tidak berisolasi), selain itu apabila terjadi gangguan bersifat permanen atau proses perbaikannya memakan waktu yang cukup lama dikarenakan pencarian lokasi gangguan jauh lebih sulit dibandingkan dengan kabel telanjang, sehingga kabel berisolasi kurang handal dalam segi perbaikannya.

2. Kabel Telanjang (tidak berisolasi)

Kabel telanjang biasa digunakan pada jaringan distribusi udara. Kabel ini memiliki tingkat keandalan yang kurang baik dimana kabel telanjang sangat rentan terkena gangguan *external* atau cuaca seperti : hujan angin, petir, taufan, dan cuaca buruk yang dapat mengakibatkan pemadaman listrik terhadap konsumen. Kabel telanjang ini sangat rentan dari setuhan pohon yang menjulang tinggi sehingga mengakibatkan arus hubung singkat. Adapun kelebihan dari kabel telanjang ini mempunyai biaya pemasangan yang relatif murah, apabila terjadi gangguan langsung dapat terdeteksi sehingga gangguan dapat segera diperbaiki dan tidak membutuhkan waktu lama untuk mendeteksi gangguan serta memudahkan apabila ingin melakukan perluasan jaringan listrik. Sehingga kabel telanjang dikategorikan handal karena cepat dalam penanganan apabila terjadi gangguan.

2.2.10.2 Pengaruh Perbedaan Jaringan Distribusi Di Daerah Perkotaan dan Pedesaan Pada Keandalan Sistem Distribusi

Sistem jaringan distribusi di daerah perkotaan dan pedesaan memiliki perbedaan dalam sistem keandalannya. Berikut pengaruh perbedaan jaringan di daerah perkotaan dan pedesaan pada keandalan sistem distribusinya :

1. Daerah Perkotaan

Pada daerah perkotaan sistem keandalan distribusinya lebih baik dikarenakan daerah perkotaan sangat jarang terdapat pohon yang tinggi yang dapat mengakibatkan timbulnya arus hubung singkat pada jaringan distribusi udara, serta pada beberapa perkotaan yang padat akan bangunan beritngkat biasanya akan menggunakan sistem jaringan bawah tanah yang memiliki tingkat keandalan yang baik. Oleh karena itu sistem distribusi diperkotaan memiliki kontinuitas penyaluran energi listrik yang baik dan terjaga. Selain itu jaringan distribusi diperkotaan besar yang banyak terdapat industri biasanya menggunakan konfigurasi spindel ataupun *mesh* yang memiliki tingkat keandalan tinggi.

2. Daerah Pedesaan

Sedangkan pada daerah pedesaan sistem keandalan distribusinya kurang begitu handal dikarenakan pada titik penyaluran sampai ke pusat beban jarangnya cukup jauh sehingga memerlukan jarak penyaluran yang panjang dan memiliki resiko terkena gangguan tinggi akibat pepohonan serta faktor-faktor lain. Oleh karena itu kemungkinan terjadi gangguan jauh lebih tinggi dibanding dengan daerah perkotaan. Pada daerah pedesaan kebanyakan sistem konfigurasinya juga masih menggunakan sistem radial ataupun *loop* yang memiliki tingkat keandalan rendah.

2.2.11 Indeks Keandalan Yang Dihitung Pada Jaringan Distribusi

Indeks keandalan pada jaringan distribusi yaitu suatu petunjuk atau indikator yang digunakan dalam melakukan evaluasi tingkat keandalan sistem distribusi yang dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas. Sejumlah indeks sudah dikembangkan dalam menyediakan suatu kerangka untuk mengevaluasi keandalan sistem tenaga listrik. Berikut adalah parameter-parameter yang

digunakan untuk menentukan keandalan sistem jaringan distribusi dan cara perhitungannya :

1. Indeks Berorientasi Pada Pelanggan

a.) SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*)

SAIDI merupakan perhitungan indeks tentang durasi pemadaman rata-rata untuk setiap konsumen dalam kurun satu tahun pada suatu area yang di evaluasi. Secara matematis dituliskan sebagai berikut :

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{jumlah dari perkalian jam pemadaman dan pelanggan padam}}{\text{Total Jumlah Pelanggan yang dilayani}}$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum(U_i.N_i)}{\sum N} \dots\dots\dots\text{persamaan (2.1)}$$

Dimana : U_i = jumlah lamanya pemadaman

N_i = jumlah pelanggan yang mengalami pemadaman

$\sum N$ = jumlah total pelanggan

b.) SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*)

SAIFI merupakan perhitungan indeks frekuensi pemadaman rata-rata untuk setiap konsumen dalam kurun waktu setahun pada suatu area yang di evaluasi. Nilainya adalah jumlah gangguan yang terjadi dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Secara sistematis ditulis sebagai berikut :

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{jumlah dari perkalian frekuensi pemadaman dan pelanggan padam}}{\text{Total Jumlah Pelanggan yang dilayani}}$$

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum(\lambda_i.N_i)}{\sum N} \dots\dots\dots\text{persamaan (2.2)}$$

Dimana : λ_i = jumlah frekuensi pemadaman

N_i = jumlah pelanggan yang mengalami pemadaman

$\sum N$ = jumlah total pelanggan

2. Indeks Berorientasi Pada Beban Serta Energi

Selain dua parameter keandalan yang umum dipakai diatas, ada pula beberapa indeks tambahan yang digunakan sebagai mengevaluasi keandalan suatu sistem distribusi, yaitu indek yang berorientasi kepada beban dan energi. Berikut parameter untuk mengevaluasi keandalan berdasarkan beban serta energi :

a.) ENS (*Energy Not Supplied*)

ENS (*Energy Not Supplied*) adalah indeks keandalan yang menyatakan jumlah energi yang tidak dapat disalurkan oleh sistem kepada pelanggan selama periode satu tahun. Ini didefinisikan sebagai penjumlahan energi yang hilang akibat adanya gangguan terhadap pasokan daya selama periode satu tahun. Secara sistematis rumus perhitungan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$ENS = \sum [\text{Gangguan (kW)} \times \text{Durasi (h)}] \dots \dots \text{persamaan(2.3)}$$

b.) AENS (*Avarage Energy Not Supplied*)

AENS adalah indeks rata-rata energi yang tidak disalurkan akibat terjadi nya pemadaman. AENS dinyatakan perbandingan jumlah energi yang hilang pada saat terjadi gangguan pemadaman dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Secara sistimatis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$AENS = \frac{\text{jumlah energi yang tidak tersalurkan oleh sistem}}{\text{jumlah pelanggan yan gdilayani}}$$

$$AENS = \frac{ENS}{\sum N} \dots \dots \dots \text{persamaan (2.4)}$$

Dimana, N = jumlah pelanggan yang dilayani

c.) Daya Gangguan

Daya Gangguan yaitu cara untuk menghitung seberapa besar daya yang mengalir pada saat terjadi gangguan, secara sistematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Daya Gangguan} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi$$

Dimana, V = tegangan (kV)

I = Arus (Ampere)

$$\cos \varphi = 0,8$$

2.2.12 Standar Nilai Indeks Keandalan

Yang dimaksud oleh standar nilai indeks keandalan yaitu ketetapan nilai minimum yang hendaknya dapat dipenuhi oleh suatu sistem distribusi agar keandalan penyaluran energi listrik kepada pelanggan dapat terjamin kualitasnya. Selain itu, standar keandalan juga bertindak sebagai tolak ukur terhadap kemajuan serta peningkatan mutu pelayanan yang akan dicapai oleh PLN. Adapun dua standar yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya yaitu :

2.2.12.1 Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 68-2:1986

Adapun standar keandalan yang ditetapkan oleh SPLN bertujuan untuk menetapkan serta menjelaskan tingkat keandalan sistem distribusi energi listrik. Selain itu juga bertujuan untuk memberi tolak ukur terhadap kemajuan dan menentukan target yang akan dicapai oleh perusahaan tersebut. Berikut adalah tabel indeks keandalan SPLN.

Tabel 2.2 Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 68-2:1986

Indek Keandalan	Standar Nilai	Satuan
SAIFI	3,2	Kali/Pelanggan/Tahun
SAIDI	21,09	Jam/Pelanggan/Tahun

2.2.12.2 Standar Indeks Keandalan IEEE std 1366-2003

Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan standar atau ketetapan nilai indeks keandalan IEEE std 1366-2003.

Tabel 2.3 Standar Indeks Keandalan IEEEstd 1366-2003

Indek Keandalan	Standar Nilai	Satuan
SAIFI	1,45	Kali/Pelanggan/Tahun
SAIDI	2,30	Jam/Pelanggan/Tahun