

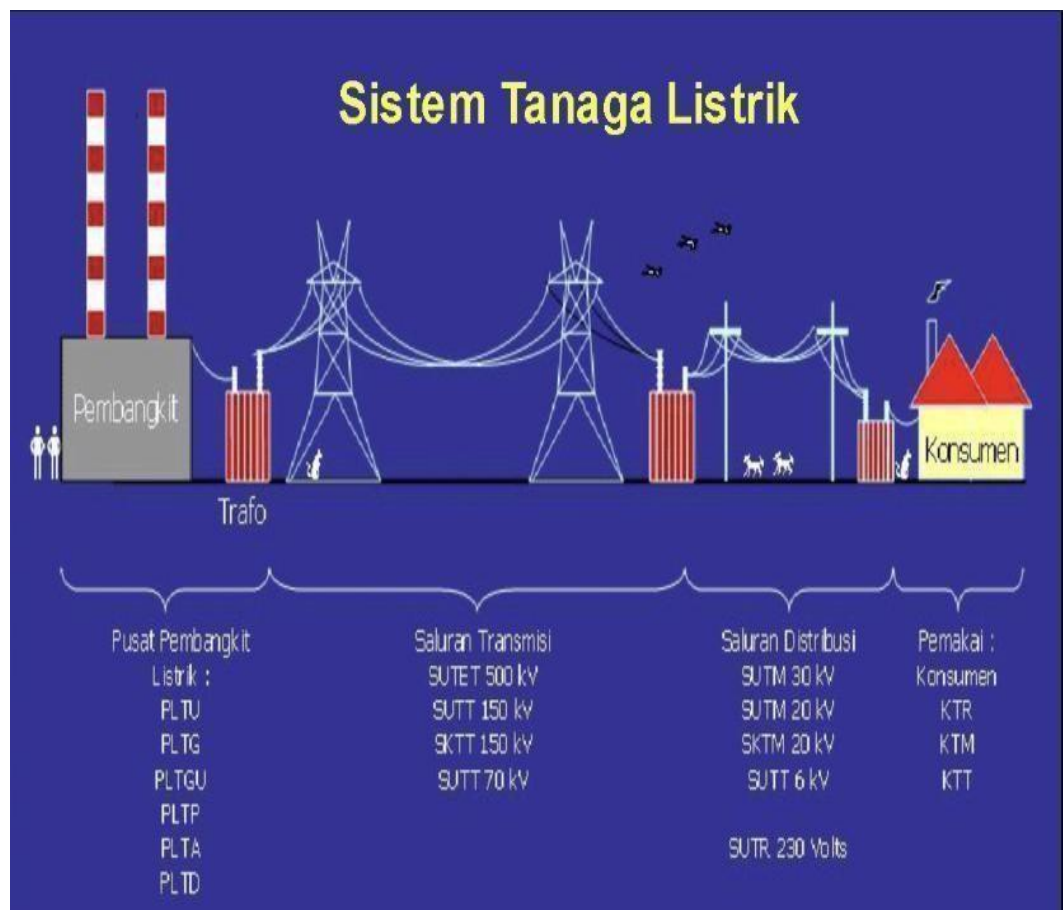
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Konsep Dasar Sistem Tenaga Listrik

Secara umum, sistem tenaga listrik tersusun atas tiga komponen utama, yaitu pembangkit listrik, jaringan transmisi, dan sistem distribusi. Ketiga komponen tersebut saling terhubung dan berfungsi sebagai satu kesatuan yang bekerja untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkitan menuju ke lokasi beban atau konsumen akhir. Rangkaian sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar dibawah ini. [1]



Gambar 1 Sistem Rangkaian Tenaga Listrik

Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit akan disalurkan melalui jaringan transmisi kemudian disalurkan melalui jaringan distribusi hingga sampai ke pelanggan.

2.1.2 Struktur Umum Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan terintegrasi yang berfungsi untuk membangkitkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik dari sumber pembangkitan hingga ke konsumen akhir. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri atas tiga komponen utama, yaitu pusat pembangkit listrik, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Ketiga komponen tersebut saling berkaitan dan bekerja secara berurutan dalam menjamin kontinuitas, keandalan, dan kualitas penyaluran energi listrik.

a. Pusat Pembangkit Listrik (Power Plant)

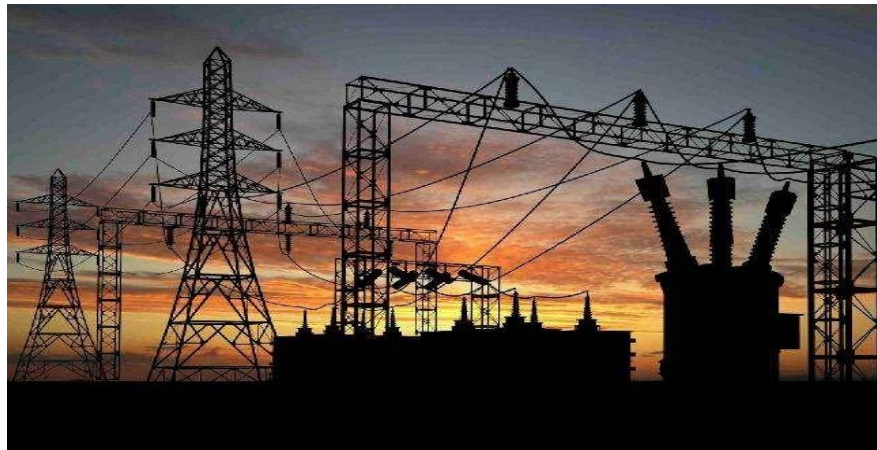
Pusat pembangkit listrik merupakan tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak awal (*Prime Mover*) dan generator yang membangkitkan listrik dengan mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Biasanya di pusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain : transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5kV) menjadi tegangan transmisi atau tegangan tinggi (150kV) dan juga peralatan pengaman dan pengatur. Secara umum, jenis pusat pembangkit dibagi kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit *hidro* yaitu PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) dan pembangkit *thermal* diantaranya yaitu PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir), dan PLTGU (Pusat Listrik Tenaga Gas Uap).



Gambar 2 Pembangkit Listrik

b. Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dalam jumlah besar dari pusat pembangkit menuju pusat beban atau gardu induk distribusi melalui jaringan bertegangan tinggi atau ekstra tinggi. Penggunaan tegangan tinggi dan ekstra tinggi bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan menjaga stabilitas sistem. Dengan dukungan sistem proteksi dan pengendalian yang baik, transmisi tenaga listrik mampu menjamin kontinuitas dan keandalan suplai energi dalam skala luas. Sistem transmisi memiliki peranan penting dalam menjaga efisiensi penyaluran daya, stabilitas sistem, serta kontinuitas pelayanan energi listrik dalam skala regional maupun nasional.



Gambar 3 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

c. Sistem Distribusi

Sistem distribusi ini adalah sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pengguna listrik dan pada umumnya berfungsi dalam hal penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Sub sistem ini terdiri dari : pusat pengatur atau gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah atau jaringan primer (20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, saluran tegangan rendah atau jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan trafo.



Gambar 4 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.1.3 Sistem Jaringan Distribusi

Sistem jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk distribusi ke konsumen akhir. Sistem ini menjadi penghubung terakhir antara penyedia tenaga listrik dan pelanggan, sehingga memiliki peran strategis dalam menjamin kualitas tegangan, kontinuitas pelayanan, serta keandalan pasokan energi listrik. Keandalan sistem distribusi sangat menentukan tingkat gangguan yang dirasakan langsung oleh pengguna akhir, baik pelanggan rumah tangga, komersial, maupun industri. Secara umum, sistem jaringan distribusi dibagi menjadi dua tingkat tegangan, yaitu jaringan distribusi tegangan menengah dan jaringan distribusi tegangan rendah. Pada sistem distribusi di Indonesia, tegangan menengah umumnya berada pada level 20 kV, sedangkan tegangan rendah berada pada level 220/380 V. Energi listrik dari sistem transmisi terlebih dahulu diturunkan tegangannya melalui transformator daya di gardu induk menjadi tegangan menengah, kemudian disalurkan melalui penyulang (*feeder*) menuju gardu distribusi. Pada gardu distribusi, tegangan kembali diturunkan menjadi tegangan rendah sebelum disalurkan ke konsumen.

Berdasarkan konfigurasi jaringannya, sistem distribusi dapat dibedakan menjadi beberapa bentuk utama, yaitu jaringan radial, jaringan ring (loop), dan jaringan mesh. Jaringan radial merupakan konfigurasi paling sederhana, di mana penyaluran daya dilakukan melalui satu jalur utama dari sumber ke beban. Keunggulan sistem ini terletak pada kemudahan perancangan dan biaya investasi yang relatif rendah, namun kelemahannya adalah tingkat keandalan yang lebih rendah karena gangguan pada satu titik dapat menyebabkan pemadaman pada seluruh jalur di bawahnya.

Jaringan ring atau loop merupakan pengembangan dari sistem radial dengan membentuk jalur tertutup. Konfigurasi ini memungkinkan suplai daya dari dua arah, sehingga apabila terjadi gangguan pada satu sisi, pasokan masih dapat dialihkan dari sisi lainnya. Sistem ini lebih andal dibandingkan radial, meskipun memerlukan pengaturan proteksi yang lebih kompleks.

Sementara itu, jaringan mesh memiliki lebih dari satu jalur interkoneksi antar penyulang, sehingga menyediakan tingkat keandalan yang lebih tinggi. Sistem ini umumnya diterapkan pada kawasan dengan kepadatan beban tinggi atau pada pusat kota dan kawasan industri strategis. Namun, kompleksitas proteksi dan biaya investasi menjadi pertimbangan dalam penerapannya.

Dalam aspek teknis operasional, sistem jaringan distribusi dilengkapi dengan berbagai peralatan proteksi dan pengendalian, seperti pemutus tenaga (*circuit breaker*), recloser, sectionalizer, dan relay proteksi. Peralatan tersebut berfungsi untuk mendeteksi serta mengisolasi gangguan agar tidak meluas dan mengganggu kontinuitas sistem secara keseluruhan. Selain itu, pengaturan tegangan (*voltage regulation*) dan kompensasi daya reaktif juga menjadi bagian penting dalam menjaga kualitas daya listrik yang disalurkan kepada konsumen.

Secara keseluruhan, sistem jaringan distribusi tidak hanya berperan sebagai media penyaluran energi listrik, tetapi juga sebagai sistem yang harus dirancang dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, keandalan, serta keselamatan kerja. Perencanaan dan pengelolaan jaringan distribusi yang baik akan mendukung terciptanya sistem tenaga listrik yang efisien, stabil, dan berkelanjutan.



Gambar 5 Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.1.4 Komponen Utama Jaringan SUTM

Jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) terdiri atas berbagai komponen yang masing-masing memiliki peran dan fungsi tersendiri dalam sistem distribusi listrik. Adapun komponen utama dari jaringan SUTM antara lain sebagai berikut:

1. Tiang

Tiang merupakan salah satu elemen penting pada jaringan distribusi tegangan menengah yang berfungsi sebagai penopang atau penyangga konduktor. Komponen ini harus memiliki kekuatan mekanis yang cukup tinggi untuk menahan beban tarikan dari penghantar listrik. Berdasarkan material pembuatnya, tiang listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu tiang beton, tiang kayu, dan tiang baja.



Gambar 6 Tiang Beton



Gambar 7 Tiang Kayu Ulin



Gambar 8 Tiang Besi

2. Isolator

Isolator jaringan listrik merupakan salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menopang konduktor sekaligus mengisolasi konduktor bertegangan dari struktur penyangga atau tanah. Dalam sistem distribusi maupun transmisi, isolator berperan menjaga agar arus listrik tetap mengalir melalui konduktor tanpa terjadi kebocoran arus (*leakage current*) ke bagian konstruksi seperti tiang, menara, atau lengan penyangga (*cross arm*). Dengan demikian, isolator memiliki peranan vital dalam menjaga keselamatan, keandalan, serta kontinuitas sistem tenaga listrik.

Secara prinsip kerja, isolator harus memiliki tahanan listrik yang sangat tinggi serta kekuatan mekanik yang memadai untuk menahan beban konduktor dan gaya tarik akibat angin maupun beban tambahan lainnya. Selain itu, isolator juga harus mampu menahan tegangan kerja sistem dan tegangan lebih (*overvoltage*) yang mungkin terjadi akibat gangguan hubung singkat atau sambaran petir. Kinerja isolator sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kelembaban, polusi, dan suhu, yang dapat menurunkan kemampuan isolasi permukaan dan menyebabkan terjadinya loncatan api (*flashover*).

Dalam praktiknya, isolator dibuat dari beberapa jenis material utama, yaitu porselen, kaca, dan polimer (komposit). Isolator porselen dan kaca memiliki karakteristik ketahanan mekanik yang baik dan telah digunakan secara luas dalam sistem transmisi maupun distribusi. Sementara itu, isolator polimer memiliki bobot lebih ringan serta ketahanan lebih baik terhadap polusi dan kontaminasi lingkungan, sehingga banyak digunakan pada sistem distribusi modern.



Gambar 9 Isolator Pin



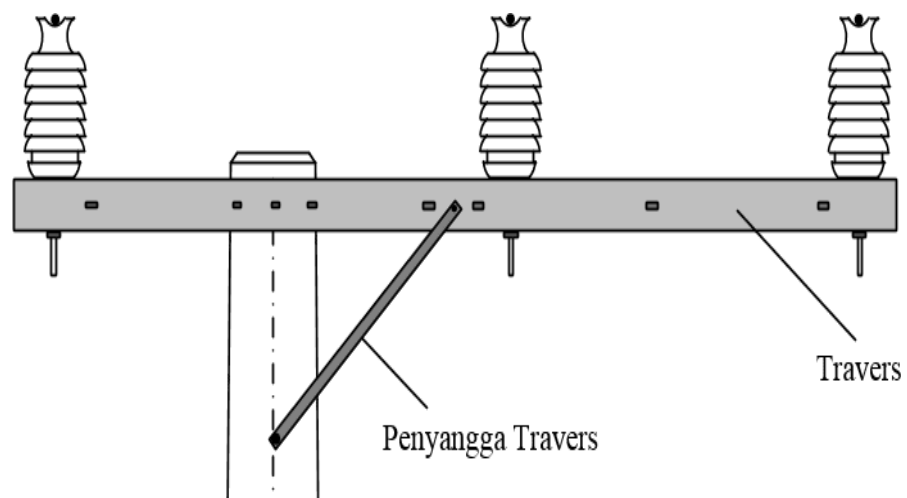
Gambar 10 Isolator Tarik

3. Travers (Cross Arm)

Travers atau *cross arm* merupakan salah satu komponen konstruksi penting dalam jaringan distribusi tenaga listrik, khususnya pada sistem jaringan udara (*overhead distribution line*). Travers berfungsi sebagai lengan penyangga yang dipasang secara horizontal pada tiang listrik untuk menopang isolator dan konduktor, sekaligus menjaga jarak antar fasa agar sesuai dengan standar keselamatan dan teknis operasional.

Dalam sistem distribusi tegangan menengah (misalnya 20 kV), travers umumnya terbuat dari baja galvanis, baja profil siku, atau kayu keras yang memiliki kekuatan mekanik tinggi serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Pada konstruksi modern, penggunaan baja galvanis lebih banyak dipilih karena memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap korosi dan beban tarik konduktor.

Berdasarkan fungsinya dalam jaringan distribusi, travers dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu travers lurus, travers sudut, dan travers percabangan. Travers lurus digunakan pada jalur distribusi yang tidak mengalami perubahan arah. Travers sudut digunakan pada titik belokan jaringan dan dirancang untuk menahan gaya tarik yang lebih besar akibat perubahan arah konduktor. Sementara itu, travers percabangan digunakan pada titik pemisahan penyulang untuk menyalurkan daya ke arah yang berbeda.



Gambar 11 Travers (Cross Arm)

4. Penghantar

Penghantar merupakan komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai media penyalur energi listrik dari satu titik ke titik lainnya. Dalam sistem jaringan distribusi, penghantar digunakan untuk mengalirkan daya listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi dan selanjutnya ke pelanggan akhir. Oleh karena itu, pemilihan jenis penghantar harus mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, serta kondisi lingkungan agar sistem dapat beroperasi secara efisien dan andal. Secara prinsip, penghantar harus memiliki konduktivitas listrik yang tinggi untuk meminimalkan rugi-rugi daya akibat hambatan listrik (*resistance losses*). Selain itu, penghantar juga harus memiliki kekuatan mekanik yang cukup untuk menahan gaya tarik, beban angin, serta beban tambahan lainnya. Dalam sistem distribusi udara (*overhead distribution line*), penghantar tidak hanya berfungsi sebagai media penghantar arus listrik, tetapi juga sebagai elemen struktural yang harus mampu menopang berat sendiri dalam bentangan antar tiang.

Secara umum, bahan yang paling banyak digunakan sebagai penghantar adalah tembaga dan aluminium. Tembaga memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi dibandingkan aluminium, namun aluminium lebih ringan dan lebih ekonomis sehingga lebih banyak digunakan pada jaringan distribusi dan transmisi modern. Untuk meningkatkan kekuatan mekanik aluminium, sering digunakan kombinasi aluminium dengan inti baja, yang dikenal sebagai Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR). Konduktor jenis ini memiliki konduktivitas yang baik sekaligus kekuatan tarik tinggi.



Gambar 12 Penghantar

Penghantar telanjang adalah konduktor tanpa lapisan isolasi yang biasanya digunakan pada jaringan distribusi udara tegangan menengah. Penghantar ini dipasang pada isolator dan digantung pada travers tiang listrik. Karena tidak memiliki pelindung isolasi, jarak antar fasa dan jarak terhadap tanah harus diperhitungkan secara cermat sesuai standar keselamatan. Jenis yang umum digunakan antara lain: AAC (All Aluminium Conductor), AAAC (All Aluminium Alloy Conductor), ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

5. Fuse Cut Out

Fuse Cut Out (FCO) merupakan salah satu peralatan proteksi yang digunakan dalam sistem jaringan distribusi tenaga listrik, khususnya pada jaringan tegangan menengah (misalnya 20 kV). FCO berfungsi sebagai alat pengaman terhadap gangguan arus lebih (*overcurrent*) dan hubung singkat (*short circuit*) yang dapat merusak peralatan jaringan, seperti transformator distribusi maupun penyulang cabang. Peralatan ini dipasang pada tiang distribusi dan umumnya digunakan sebagai proteksi primer pada sisi tegangan menengah transformator distribusi.

Secara prinsip kerja, Fuse Cut Out mengandalkan elemen lebur (*fuse link*) yang dirancang untuk meleleh ketika arus yang mengalir melebihi batas nominal yang diizinkan. Ketika terjadi gangguan, arus yang meningkat secara signifikan akan menyebabkan elemen lebur putus, sehingga rangkaian listrik terputus dan bagian sistem yang terganggu terisolasi dari jaringan utama. Mekanisme ini mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan serta membatasi area terdampak gangguan.



Gambar 13 Fuse Cut Out

Fuse Cut Out berperan penting dalam meningkatkan keandalan sistem distribusi. Dengan memutus arus gangguan secara cepat dan selektif, FCO membantu mengurangi durasi dan luas pemadaman. Proteksi yang efektif terhadap transformator distribusi juga memperpanjang umur peralatan dan mengurangi biaya perbaikan.

Namun demikian, FCO memiliki keterbatasan karena bersifat non-reclosable (tidak dapat tersambung kembali secara otomatis). Setelah terjadi gangguan, fuse link harus diganti secara manual oleh petugas. Oleh karena itu, dalam beberapa jaringan modern, FCO sering dikombinasikan dengan peralatan proteksi lain seperti recloser untuk meningkatkan fleksibilitas sistem.

6. Lightning Arrester

Lightning Arrester (LA) atau penangkal surja petir merupakan salah satu peralatan proteksi yang digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk melindungi peralatan jaringan dari tegangan lebih (*overvoltage*) akibat sambaran petir maupun gangguan surja lainnya. Dalam sistem jaringan distribusi, terutama pada tegangan menengah seperti 20 kV, lightning arrester dipasang untuk melindungi transformator distribusi, konduktor, serta peralatan proteksi lainnya dari kerusakan akibat lonjakan tegangan yang melebihi batas ketahanan isolasi. Tegangan lebih pada sistem tenaga listrik dapat disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu tegangan lebih eksternal akibat sambaran petir (*external overvoltage*) dan tegangan lebih internal akibat operasi switching (*switching overvoltage*). Sambaran petir langsung pada saluran udara atau induksi elektromagnetik di sekitar jaringan dapat menghasilkan lonjakan tegangan dengan amplitudo sangat tinggi dan durasi sangat singkat. Jika tidak dikendalikan, tegangan lebih ini dapat menyebabkan kegagalan isolasi, kerusakan transformator, bahkan pemadaman sistem secara luas.

Lightning arrester berperan penting dalam menjaga keandalan sistem jaringan distribusi, terutama pada daerah dengan intensitas petir tinggi. Tanpa proteksi yang memadai, gangguan akibat petir dapat meningkatkan frekuensi pemadaman (SAIFI) dan durasi gangguan (SAIDI). Oleh karena itu, koordinasi antara lightning arrester, sistem pentanahan, dan peralatan proteksi lainnya

harus dirancang secara terpadu agar mampu memberikan perlindungan optimal.



Gambar 14 Lighting Arrester

7. Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem jaringan distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah sesuai kebutuhan konsumen. Pada sistem distribusi di Indonesia, transformator distribusi umumnya menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 220/380 V. Peralatan ini menjadi penghubung antara jaringan tegangan menengah dan pelanggan akhir, sehingga keberadaannya sangat menentukan kualitas dan kontinuitas pelayanan tenaga listrik.

Secara prinsip kerja, transformator distribusi bekerja berdasarkan hukum induksi elektromagnetik. Ketika arus bolak-balik mengalir pada kumparan primer, medan magnet yang berubah-ubah akan menginduksi tegangan pada kumparan sekunder. Besarnya tegangan keluaran ditentukan oleh perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder (*turn ratio*).

Transformator distribusi memiliki peran strategis dalam menjaga keandalan sistem jaringan distribusi. Gangguan pada transformator dapat menyebabkan pemadaman langsung pada sejumlah pelanggan yang dilayaninya. Oleh karena itu, proteksi transformator biasanya dilengkapi dengan Fuse Cut Out (FCO), Lightning Arrester (LA), serta sistem pentanahan

yang baik untuk mencegah kerusakan akibat gangguan arus lebih maupun tegangan lebih.



Gambar 15 Transformator Distribusi

8. Sistem Grounding (Pentanahan)

Sistem grounding atau pentanahan merupakan bagian fundamental dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menghubungkan bagian tertentu dari instalasi listrik ke tanah melalui penghantar dengan impedansi rendah. Tujuan utama sistem pentanahan adalah untuk menjamin keselamatan manusia, melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat gangguan, serta menjaga stabilitas operasi sistem tenaga listrik.

Dalam sistem jaringan distribusi, pentanahan berperan penting dalam mengalirkan arus gangguan, arus bocor, maupun arus surja akibat sambaran petir ke tanah sehingga tidak merusak peralatan atau membahayakan personel. Tanpa sistem pentanahan yang baik, tegangan sentuh (*touch voltage*) dan tegangan langkah (*step voltage*) dapat mencapai nilai yang berbahaya dan berpotensi menyebabkan kecelakaan kerja maupun kerusakan sistem.

Sistem grounding atau pentanahan merupakan salah satu bagian penting pada jaringan tegangan menengah yang berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan maupun lonjakan tegangan ke permukaan tanah. Melalui sistem ini, arus gangguan dari Fuse Cut Out (FCO) serta tegangan lebih yang berasal dari Lightning Arrester (LA) dapat dialirkan dengan aman ke tanah, sehingga melindungi peralatan jaringan dari kerusakan akibat tegangan lebih. Nilai

tahanan pentanahan yang baik umumnya diusahakan serendah mungkin, tergantung pada standar yang berlaku dan jenis instalasi. Pada sistem distribusi, nilai tahanan tanah yang rendah sangat penting untuk memastikan efektivitas proteksi terhadap gangguan dan petir.



Gambar 16 Grounding Road

9. Load Break Switch Manual

Load Break Switch (LBS) Manual merupakan salah satu peralatan switching yang digunakan dalam sistem jaringan distribusi tenaga listrik, khususnya pada jaringan tegangan menengah (misalnya 20 kV). Peralatan ini berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan rangkaian listrik dalam kondisi berbeban (*load current*), namun tidak dirancang untuk memutus arus hubung singkat dalam kapasitas besar seperti circuit breaker. Oleh karena itu, LBS berperan sebagai perangkat manuver jaringan untuk keperluan pengoperasian dan pemeliharaan sistem distribusi.

Dalam sistem distribusi, LBS manual umumnya dipasang pada tiang jaringan (*pole mounted*) atau di dalam gardu hubung (*switching cubicle*). Pengoperasiannya dilakukan secara manual menggunakan tuas atau tongkat operasi (*operating handle* atau *hot stick*), sehingga petugas harus memastikan prosedur keselamatan kerja dipatuhi secara ketat. Penggunaan LBS manual memungkinkan dilakukan pemisahan bagian jaringan tertentu tanpa harus memadamkan seluruh penyulang. Load Break Switch memiliki kontribusi

penting dalam meningkatkan keandalan sistem jaringan distribusi. Dengan kemampuan manuver jaringan, LBS memungkinkan pengalihan suplai listrik ketika terjadi gangguan pada salah satu penyulang, sehingga pemadaman dapat diminimalkan. Hal ini berdampak pada penurunan nilai indeks gangguan seperti SAIDI dan SAIFI.

Selain itu, keberadaan LBS mendukung penerapan sistem distribusi dengan konfigurasi ring atau spindle yang membutuhkan fleksibilitas dalam pengaturan aliran daya. Namun, karena bersifat manual, waktu respon terhadap gangguan sangat bergantung pada kecepatan petugas dalam melakukan operasi switching.



Gambar 17 LBS (Loaad Break Switch) Manual

10. Sectionalizer (Saklar Seksi Otomatis)

Sectionalizer atau Saklar Seksi Otomatis merupakan salah satu peralatan proteksi yang digunakan dalam sistem jaringan distribusi tenaga listrik untuk mengisolasi bagian jaringan yang mengalami gangguan secara selektif. Perangkat ini bekerja secara terkoordinasi dengan peralatan proteksi utama seperti recloser atau circuit breaker, dengan tujuan membatasi area pemadaman dan meningkatkan keandalan sistem distribusi.

Pada jaringan distribusi tegangan menengah (misalnya 20 kV), sectionalizer biasanya dipasang di sepanjang penyulang (feeder) sebagai titik

pembagi jaringan. Berbeda dengan pemutus tenaga yang mampu memutus arus gangguan secara langsung, sectionalizer tidak memiliki kemampuan memutus arus hubung singkat dalam kondisi berbeban. Sebaliknya, perangkat ini bekerja dengan mendeteksi jumlah operasi pemutusan oleh recloser yang berada di sisi hulu, kemudian membuka kontakannya saat kondisi jaringan bebas tegangan.



Gambar 18 Sectionalizer (Saklar Seksi Otomatis)

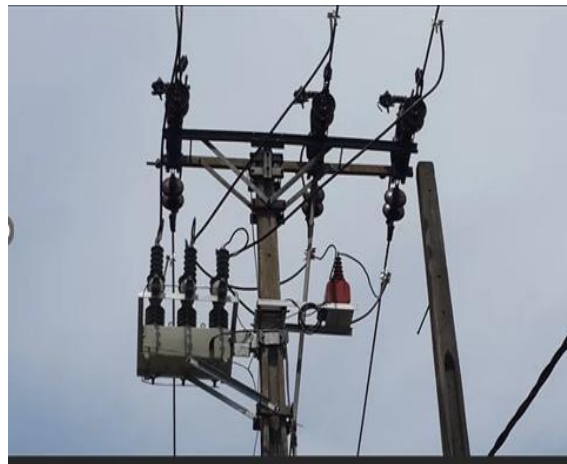
Secara prinsip, sectionalizer bekerja berdasarkan penghitung jumlah gangguan (*fault count*). Ketika terjadi gangguan pada jaringan, recloser di sisi hulu akan membuka dan menutup kembali secara otomatis beberapa kali untuk memastikan apakah gangguan bersifat sementara atau permanen. Sectionalizer akan menghitung jumlah operasi tersebut.

Jika gangguan bersifat permanen dan jumlah operasi recloser telah mencapai nilai yang ditentukan, maka sectionalizer akan membuka kontakannya saat jaringan dalam kondisi tidak bertegangan (ketika recloser terbuka). Dengan demikian, bagian jaringan yang mengalami gangguan akan terisolasi. Setelah itu, recloser dapat menutup kembali dan memulihkan suplai listrik ke bagian jaringan yang tidak terganggu. Prinsip kerja ini memungkinkan isolasi gangguan dilakukan secara selektif tanpa memadamkan seluruh penyulang.

11. Recloser (Pemutus Balik Otomatis)

Recloser atau Pemutus Balik Otomatis merupakan salah satu peralatan proteksi utama dalam sistem jaringan distribusi tenaga listrik, khususnya pada jaringan tegangan menengah seperti 20 kV. Perangkat ini berfungsi untuk mendeteksi, memutuskan, dan menyambungkan kembali aliran listrik secara otomatis ketika terjadi gangguan, terutama gangguan sementara (*temporary fault*) seperti sentuhan ranting pohon, hewan, atau gangguan akibat cuaca.

Pada sistem distribusi udara, sebagian besar gangguan bersifat sementara. Oleh karena itu, penggunaan recloser menjadi sangat penting karena memungkinkan pemulihan suplai listrik secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manual dari petugas. Dengan demikian, recloser berkontribusi signifikan terhadap peningkatan keandalan sistem distribusi dan pengurangan durasi pemadaman.



Gambar 19 Recloser (Pemutus Balik Otomatis)

Recloser bekerja berdasarkan deteksi arus gangguan menggunakan sistem proteksi internal, seperti relay arus lebih (*overcurrent relay*) dan proteksi hubung tanah (*ground fault relay*). Ketika terjadi gangguan yang menyebabkan arus melebihi batas pengaturan, recloser akan membuka kontaknya untuk memutuskan aliran listrik.

Setelah selang waktu tertentu, recloser akan menutup kembali secara otomatis (*reclose*) untuk memeriksa apakah gangguan telah hilang. Jika gangguan bersifat sementara, suplai listrik akan kembali normal. Namun,

apabila gangguan bersifat permanen dan masih terdeteksi setelah beberapa kali percobaan penutupan, recloser akan tetap dalam kondisi terbuka (*lockout*) hingga dilakukan pemeriksaan dan perbaikan.

Jumlah siklus buka-tutup (*trip-reclose*) dapat diatur sesuai kebutuhan sistem, biasanya antara dua hingga empat kali percobaan sebelum masuk kondisi *lockout*.

2.2 Penelitian Yang Relevan

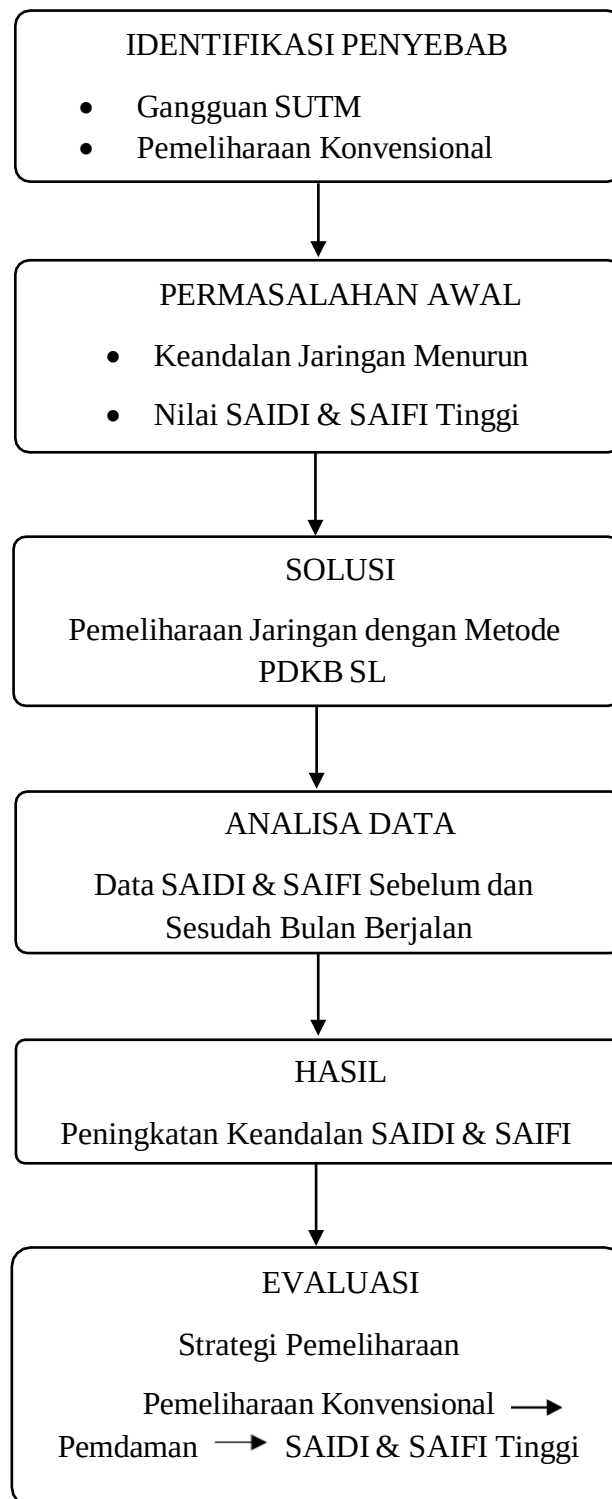
1. Menurut Pratama I., Mohammad Y., Yusuf T. I. 2023 berjudul “Analisis Keandalan Jaringan Distribusi 20kV Pada ULP Toili Berdasarkan SAIDI dan SAIFI” Metode yang digunakan untuk menghitung Lama Padam Rata-Rata (LPR) dan Frekuensi Padam Rata-Rata (FPR) ialah dengan menggunakan rumus SAIDI dan SAIFI, yaitu menghitung dengan berdasarkan data gangguan atau pemadaman dan jumlah konsumen. Nilai SAIDI sistem distribusi 20kV PT. PLN (Persero) ULP Toili pada tahun 2021 dan tahun 2022 termasuk masih dalam kategori standar karena belum melewati SPLN 68-2: 1986 yaitu SAIDI sebesar 21 Jam/Pelanggan/ Tahun. Sedangkan nilai SAIFI sistem distribusi 20kV PT. PLN (Persero) ULP Toili pada tahun 2021 dan tahun 2022 kategori belum andal karena melewati SPLN yaitu SAIFI sebesar 3,2 Kali/Pelanggan/Tahun. [2]
2. Menurut Dasman D., Handayani H, 2017 berjudul “Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Metode SAIDI dan SAIFI di PT. PLN (Persero) Rayon Lubuk Alung Tahun 2015” dalam mendapatkan nilai indeks SAIDI dan SAIFI, perhitungan dilakukan dengan berorientasi pada pelanggan. Dalam menentukan handal atau tidak handalnya sistem distribusi, PT. PLN (Persero) Rayon Lubuk Alung menetapkan indeks target kumulatif yaitu 531,510 untuk SAIDI dan 10,100 untuk SAIFI. Sistem distribusi dapat dikatakan handal jika realisasi nilai SAIDI dan SAIFI berada dibawah target yang sudah ditetapkan. [3]
3. Menurut Dalimunte M. A. H., Sam J. F., Syahrudin M. 2023 berjudul “Dampak Indeks Saidi Dan Saifi Terhadap Keandalan Sistem Distribusi Pada Penyulang Da.05 Kota Medan” Keandalan pada penyulang DA.05 dianalisis

dengan cara menghitung System Average Interruption Duration Index (SAIDI) dan System Average Interruption Frequency Index (SAIFI). Hasil perhitungan yang didapatkan untuk SAIDI sebesar 5,15 jam per tahun dan SAIFI sebesar 45,16 kali per tahun. Dari hasil perhitungan tersebut dapat dikategorikan nilai indeks SAIDI dalam keadaan andal. Sedangkan nilai SAIFI dikategorikan tidak andal karena masih dibawah dengan standar menurut SPLN No 68-2 1986 yaitu untuk SAIDI sebesar 12,8 jam per tahun dan SAIFI sebesar 2,4 kali per tahun. [4]

4. Menurut Zulkipli U., Pathoni H., Tessel D berjudul “Studi Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV PT. PLN (Persero) UP3 Jambi ULP Kotabaru” Untuk mengukur tingkat keandalan layanan ini dipakailah standar acuan SAIFI, SAIDI, dan CAIDI. Nilai SAIDI, SAIFI, dan CAIDI didapatkan dengan mengumpulkan data jumlah gangguan, lamanya gangguan dan data pelanggan yang difokuskan pada ULP Kotabaru selama tahun 2019 sebelum dilakukan perhitungan berdasar persamaannya masing-masing. Hasil perhitungan keseluruhan hanya SAIDI yang tidak memenuhi standar IEEE akan tetapi memenuhi untuk standar SPLN dan dengan demikian tingkat keandalan sistem jaringan distribusi UP3 Jambi ULP Kotabaru dinyatakan handal. [5]

Dari berbagai penelitian yang telah penulis paparkan diatas memiliki kesamaan dengan penelitian yang akan penulis lakukan saat ini, yaitu tentang keandalan sistem jaringan distribusi.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 20 Kerangka Pemikiran

Pemeliharaan jaringan distribusi tegangan menengah (SUTM) merupakan salah satu kegiatan penting dalam menjaga keandalan sistem penyaluran tenaga listrik kepada konsumen. Gangguan atau pemadaman yang terjadi pada jaringan distribusi umumnya disebabkan oleh faktor teknis maupun lingkungan yang dapat menurunkan kontinuitas penyaluran daya listrik. Oleh karena itu, diperlukan metode pemeliharaan yang efektif tanpa harus memutus aliran listrik kepada pelanggan. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah Pemeliharaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) dengan teknik sentuh langsung.

Metode ini memungkinkan petugas melakukan pekerjaan pemeliharaan, perbaikan, atau penggantian komponen jaringan SUTM secara aman walaupun jaringan masih bertegangan. Dengan penerapan metode ini, waktu padam (outage time) dapat diminimalkan sehingga indeks keandalan sistem seperti SAIDI dan SAIFI dapat ditingkatkan.

Kerangka pemikiran ini menyoroti hubungan antara penerapan metode PDKB Sentuh Langsung terhadap peningkatan keandalan sistem distribusi, efisiensi operasional, serta keselamatan kerja petugas. Melalui analisis teknis dan evaluasi data pemeliharaan, diharapkan diperoleh pemahaman mendalam tentang efektivitas metode PDKB Sentuh Langsung dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik pada jaringan SUTM 20 kV.

2.4 Keandalan Sistem Jaringan Distribusi

Keandalan sistem jaringan distribusi merupakan salah satu indikator utama dalam menilai kinerja penyediaan tenaga listrik kepada konsumen. Secara umum, keandalan didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk menjalankan fungsinya secara kontinu dalam kondisi operasi normal tanpa mengalami gangguan yang tidak direncanakan dalam periode waktu tertentu. Dalam konteks sistem distribusi tenaga listrik, keandalan berkaitan erat dengan kontinuitas suplai, frekuensi gangguan, serta durasi pemadaman yang dialami pelanggan.

Sistem jaringan distribusi memiliki tingkat kerentanan gangguan yang relatif lebih tinggi dibandingkan sistem transmisi, karena posisinya yang langsung terhubung dengan pelanggan serta lebih banyak terpapar faktor eksternal seperti cuaca, vegetasi, gangguan hewan, maupun aktivitas manusia. Oleh karena itu, perencanaan dan pengelolaan sistem distribusi harus mempertimbangkan aspek keandalan sebagai parameter utama dalam evaluasi kinerja operasional.

Secara kuantitatif, tingkat keandalan sistem distribusi umumnya diukur menggunakan beberapa indeks keandalan, antara lain SAIDI (System Average Interruption Duration Index), SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), dan CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index). SAIDI menunjukkan rata-rata durasi pemadaman yang dialami pelanggan dalam satu periode tertentu, sedangkan SAIFI menggambarkan rata-rata frekuensi gangguan yang terjadi pada pelanggan. CAIDI merupakan rasio antara SAIDI dan SAIFI yang menunjukkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan gangguan. Indeks-indeks ini digunakan secara luas dalam evaluasi performa jaringan distribusi dan menjadi dasar dalam penetapan target pelayanan tenaga listrik.

Keandalan sistem distribusi dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain konfigurasi jaringan, kualitas peralatan, sistem proteksi, serta kecepatan penanganan gangguan. Konfigurasi jaringan radial, misalnya, memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan jaringan ring atau mesh karena gangguan pada satu titik dapat menyebabkan pemadaman pada seluruh penyulang. Oleh karena itu, pada daerah dengan kepadatan beban tinggi, sistem ring atau interkoneksi sering diterapkan untuk meningkatkan kontinuitas suplai.

Selain konfigurasi jaringan, penerapan perangkat proteksi otomatis seperti *recloser*, *sectionalizer*, dan *fault indicator* juga berperan penting dalam meningkatkan keandalan. Peralatan ini memungkinkan isolasi gangguan dilakukan secara cepat dan selektif, sehingga area terdampak dapat diminimalkan dan waktu pemulihan menjadi lebih singkat.

Penggunaan sistem otomasi distribusi (*distribution automation system*) dan *supervisory control and data acquisition* (SCADA) juga mendukung peningkatan respons terhadap gangguan secara real-time. Dalam konteks manajemen operasional, kegiatan pemeliharaan preventif dan prediktif turut berkontribusi terhadap peningkatan keandalan. Inspeksi berkala terhadap konduktor, isolator, transformator distribusi, serta komponen proteksi dapat mengurangi potensi kegagalan sistem. Selain itu, penerapan metode Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) pada jaringan distribusi juga menjadi strategi penting dalam menjaga keandalan, karena memungkinkan pemeliharaan dilakukan tanpa memadamkan suplai listrik kepada pelanggan.

Secara keseluruhan, keandalan sistem jaringan distribusi merupakan hasil dari integrasi antara perencanaan teknis, kualitas infrastruktur, sistem proteksi yang efektif, serta manajemen operasional yang responsif. Upaya peningkatan keandalan tidak hanya bertujuan mengurangi angka gangguan, tetapi juga meningkatkan kualitas pelayanan dan kepuasan pelanggan. Oleh karena itu, evaluasi dan pengendalian keandalan harus dilakukan secara berkelanjutan sebagai bagian dari strategi pengelolaan sistem tenaga listrik yang efisien dan berorientasi pada pelayanan publik.

Keandalan sistem distribusi menunjukkan kemampuan sistem untuk menyediakan energi listrik secara berkesinambungan kepada pelanggan. Indikator keandalan yang digunakan oleh PLN meliputi SAIDI (System Average Interruption Duration Index), SAIFI (System Average Interruption Duration Index) dan ENS (Energy Not Served). [6]

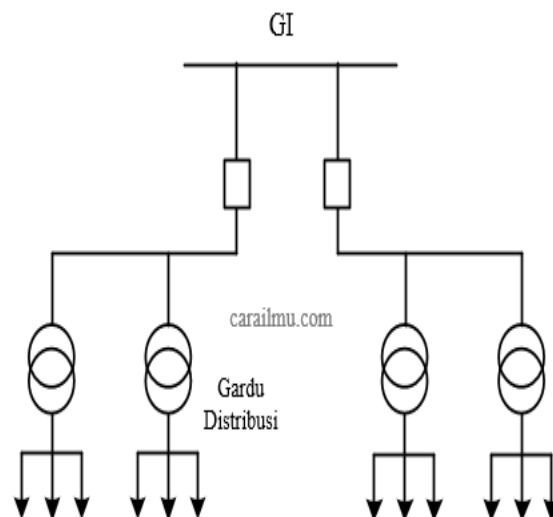
2.4.1 Jenis-Jenis Konfigurasi Sistem Jaringan Distribusi

Konfigurasi jaringan distribusi merupakan pola atau bentuk susunan penyaluran tenaga listrik dari gardu induk menuju konsumen. Pemilihan konfigurasi jaringan sangat menentukan tingkat keandalan, fleksibilitas operasi, kemudahan pemeliharaan, serta biaya investasi sistem distribusi. Secara umum, konfigurasi sistem jaringan distribusi dibedakan menjadi beberapa jenis utama, yaitu sistem radial, sistem ring (loop), sistem mesh (jaringan tertutup), dan sistem

spindle. Masing-masing konfigurasi memiliki karakteristik teknis, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan sistem.

2.4.1.1 Sistem Radial

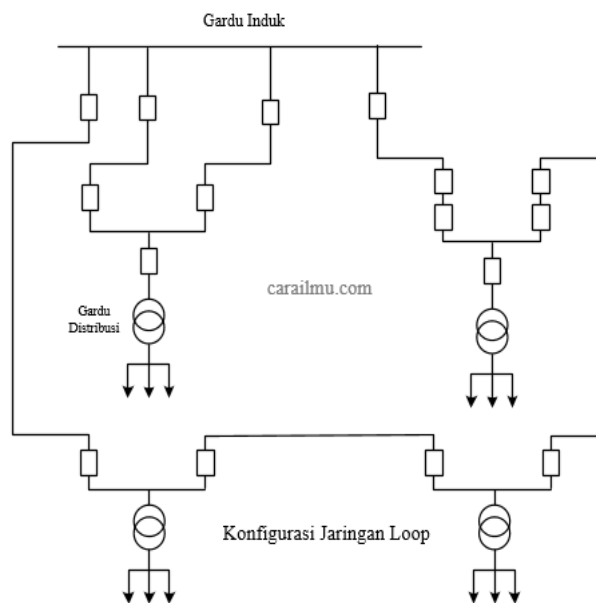
Sistem radial merupakan konfigurasi paling sederhana dan paling banyak digunakan pada jaringan distribusi, khususnya di daerah dengan kepadatan beban rendah hingga menengah. Pada sistem ini, daya listrik disalurkan dari satu sumber melalui satu jalur utama (*feeder*) menuju beban tanpa adanya jalur alternatif. Karakteristik utama sistem radial adalah aliran daya yang bersifat satu arah dan tidak memiliki interkoneksi antar penyulang. Keunggulan sistem ini terletak pada kemudahan perencanaan, pengoperasian, serta biaya konstruksi yang relatif rendah. Namun, kelemahannya adalah tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Apabila terjadi gangguan pada satu titik saluran, maka seluruh beban di hilir titik gangguan akan mengalami pemadaman. Sistem radial umumnya diterapkan pada wilayah pedesaan atau daerah dengan beban yang tersebar dan tidak terlalu padat.



Gambar 21 Jaringan Distribusi Radial

2.4.1.2 Sistem Ring (Loop)

Sistem ring atau loop merupakan pengembangan dari sistem radial dengan membentuk jaringan tertutup. Pada konfigurasi ini, penyulang membentuk jalur melingkar sehingga memungkinkan suplai daya dari dua arah. Keunggulan utama sistem ring adalah meningkatnya keandalan dibandingkan sistem radial. Jika terjadi gangguan pada salah satu sisi jaringan, pasokan listrik masih dapat dialihkan dari sisi lainnya melalui manuver jaringan. Dengan demikian, area pemadaman dapat dipersempit dan kontinuitas pelayanan lebih terjaga. Namun, sistem ring memerlukan sistem proteksi dan pengaturan beban yang lebih kompleks dibandingkan sistem radial. Konfigurasi ini umumnya digunakan di wilayah perkotaan dengan kepadatan beban menengah hingga tinggi.

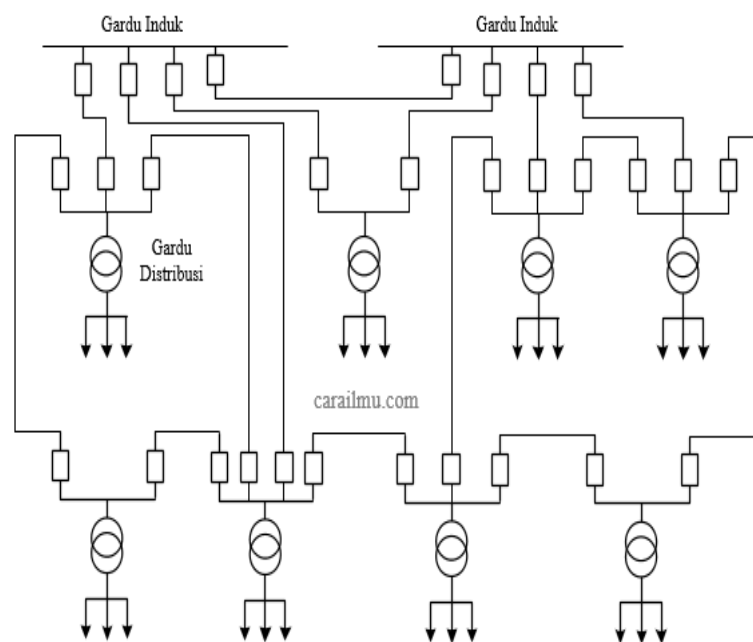


Gambar 22 Jaringan Distribusi Ring (Loop)

2.4.1.3 Sistem Mesh (Jaringan Tertutup)

Sistem mesh merupakan konfigurasi dengan tingkat interkoneksi yang tinggi, di mana beberapa penyulang saling terhubung sehingga membentuk jaringan tertutup yang kompleks. Dalam sistem ini, beban dapat menerima suplai listrik dari lebih dari satu sumber secara bersamaan.

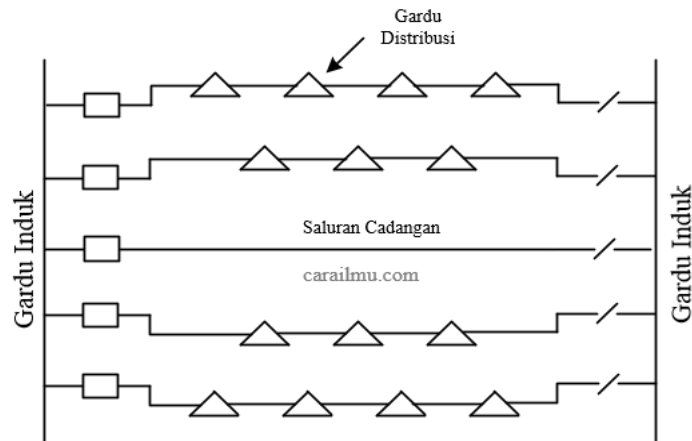
Keunggulan utama sistem mesh adalah tingkat keandalan yang sangat tinggi karena terdapat banyak jalur alternatif suplai daya. Gangguan pada satu saluran tidak secara langsung menyebabkan pemadaman luas karena daya dapat dialihkan melalui jalur lain. Konfigurasi ini umumnya diterapkan pada pusat kota besar, kawasan industri strategis, atau fasilitas vital yang memerlukan kontinuitas suplai listrik yang tinggi. Namun demikian, sistem mesh membutuhkan biaya investasi besar serta sistem proteksi dan koordinasi yang lebih rumit.



Gambar 23 Jaringan Distribusi Mesh

2.4.1.4 Sistem Spindle

Sistem spindle merupakan kombinasi antara sistem radial dan sistem ring. Pada konfigurasi ini, beberapa penyulang radial terhubung pada satu titik pusat atau *switching station*, yang memungkinkan dilakukannya manuver beban saat terjadi gangguan. Sistem spindle sering digunakan pada jaringan distribusi tegangan menengah (20 kV) di kawasan perkotaan. Konfigurasi ini memberikan keseimbangan antara tingkat keandalan dan efisiensi biaya, karena tetap memungkinkan pengalihan suplai tanpa memerlukan sistem interkoneksi sekompleks mesh.



Gambar 24 Jaringan Distribusi Spindel

2.4.2 SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

SAIDI adalah nilai rata-rata dari total lama pemadaman yang dialami oleh setiap pelanggan dalam suatu sistem distribusi listrik selama periode waktu tertentu (umumnya dalam satu tahun). Umumnya dinyatakan dalam jam/pelanggan/tahun atau menit/pelanggan/tahun. Semakin kecil nilai SAIDI, maka semakin baik tingkat keandalan dan mutu pelayanan listrik di wilayah tersebut, karena menunjukkan bahwa rata-rata pelanggan mengalami pemadaman dalam durasi yang lebih singkat. SAIDI dihitung dengan rumus:

$$SAIDI = \frac{\sum (Lama Pemadaman \times Jumlah Pelanggan Padam)}{Total Jumlah Pelanggan yang Dilayani} \dots \dots (2.1)$$

2.4.3 SAIFI (System Average Interruption Duration Index)

SAIFI didefinisikan sebagai jumlah rata-rata frekuensi (kali) pemadaman yang dialami oleh setiap pelanggan dalam suatu sistem distribusi listrik selama periode waktu tertentu. Umumnya dinyatakan dalam kali/pelanggan/tahun. Semakin kecil nilai SAIFI, semakin baik tingkat keandalan dan mutu pelayanan listrik, karena menunjukkan bahwa rata-rata pelanggan jarang mengalami pemadaman. [7]

SAIFI dihitung dengan rumus:

$$SAIFI = \frac{\sum \text{Jumlah Pelanggan Padam}}{\text{Total Jumlah Pelanggan yang Dilayani}} \dots \dots \dots (2.2)$$

2.5 Inspeksi Jaringan Tenaga Listrik

Inspeksi Jaringan Tenaga Listrik adalah kegiatan rutin yang sangat penting dan terorganisir untuk memeriksa kondisi fisik seluruh komponen jaringan distribusi (khususnya Saluran Udara Tegangan Menengah/SUTM 20 kV) guna mendeteksi potensi gangguan, kelainan, atau kerusakan sedini mungkin. [8]

Jenis inspeksi

a. Inspeksi Rutin (Preventive Inspection)

Pemeriksaan yang dilakukan secara teratur (harian, mingguan, bulanan, triwulanan, atau semesteran) pada semua komponen jaringan. Tujuannya untuk mengetahui kondisi umum jaringan dan menemukan kelainan yang dapat dilihat secara kasat mata, seperti pohon yang mendekati kawat, kawat kendur, atau isolator kotor. Umumnya dilakukan secara visual dari bawah tiang (*ground patrol*) atau menggunakan teropong.

b. Inspeksi Tahunan (Sistematis)

Pemeriksaan mendalam yang dilakukan setidaknya sekali dalam setahun. Tujuannya untuk menemukan kelainan yang tidak terdeteksi pada inspeksi rutin dan mengukur kondisi teknis peralatan. Inspeksi ini menggunakan peralatan khusus, seperti:

- Termovisi (Infrared Camera): Untuk mendeteksi *hotspot* atau sambungan yang panas pada klem, *jumper*, atau terminal FCO (Fuse Cut Out).
- Pengukuran Tahanan Pentanahan: Menguji kondisi grounding pada tiang dan peralatan proteksi (LA/Lightning Arrester).
- Inspeksi Bertegangan (Hotline Inspection): Pemeriksaan dari atas tiang saat jaringan beroperasi (online), seringkali dilakukan oleh tim PDKB.

c. Inspeksi Korektif (Corrective Inspection)

Pemeriksaan yang dilakukan sebagai tindak lanjut setelah ditemukan adanya kelainan atau setelah menerima laporan gangguan dari masyarakat/pelanggan. Tujuannya untuk memverifikasi lokasi dan jenis kerusakan yang telah dilaporkan agar tindakan perbaikan yang tepat (koreksi) dapat direncanakan.

d. Inspeksi Darurat (Emergency Inspection)

Pemeriksaan mendadak yang dilakukan segera setelah terjadi pemadaman mendadak (*trip*) pada penyulang. Tujuannya untuk menelusuri dan menemukan dengan cepat titik gangguan yang menyebabkan pemadaman agar pasokan listrik dapat dinormalkan kembali secepatnya, sekaligus sebagai penentu lingkup perbaikan darurat. [9]

2.5.1 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) Sentuh Langsung

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) metode sentuh langsung merupakan metode pemeliharaan jaringan listrik di mana pekerjaan dilakukan tanpa memutus aliran listrik, sehingga jaringan tetap dalam kondisi bertegangan. Pada metode ini, petugas PDKB melakukan kontak langsung dengan bagian jaringan bertegangan menggunakan alat pelindung diri dan peralatan kerja khusus yang telah memenuhi standar keselamatan.

Metode sentuh langsung umumnya diterapkan pada jaringan distribusi tegangan menengah, seperti SUTM 20 kV, dengan tujuan menjaga kontinuitas pasokan listrik dan meminimalkan pemadaman kepada pelanggan. Pekerjaan yang dilakukan meliputi pemeliharaan isolator, penggantian aksesoris jaringan, pengetatan sambungan, serta perbaikan ringan pada jaringan distribusi.

Pelaksanaan PDKB sentuh langsung hanya dapat dilakukan oleh petugas yang memiliki kompetensi, sertifikasi, dan pengalaman khusus, karena tingkat risiko yang tinggi. Oleh karena itu, sebelum pekerjaan dilaksanakan, dilakukan tahapan persiapan yang meliputi pemeriksaan peralatan, penggunaan alat pelindung diri lengkap, pelaksanaan briefing keselamatan, serta pengawasan kerja secara ketat. Dengan penerapan prosedur dan standar keselamatan yang tepat, PDKB metode sentuh langsung mampu meningkatkan keandalan sistem distribusi, menjaga kualitas pelayanan listrik, serta mendukung efisiensi operasional tanpa mengabaikan aspek keselamatan kerja.

2.5.2 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada PDKB Sentuh Langsung

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan serangkaian upaya untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman, sehat, dan produktif, serta mencegah kecelakaan serta dampak negatif akibat kegiatan kerja termasuk kerja bertegangan tinggi (PDKB). Tujuan K3 adalah meminimalkan risiko dan

mempertahankan keselamatan pekerja sesuai prinsip *Occupational Safety and Health* (ILO) dalam konteks elektrik. Risiko kerja listrik termasuk sengatan listrik, luka bakar, dan cedera akibat arcing atau flashover, yang menuntut penjagaan yang ketat terhadap protokol keselamatan.

Pada pelaksanaan PDKB sentuh langsung, potensi bahaya yang dapat timbul meliputi:

1. Bahaya sengatan listrik (electric shock): Kontak langsung atau tidak langsung dengan konduktor bertegangan dapat menyebabkan arus listrik mengalir melalui tubuh pekerja sehingga berpotensi fatal.
2. Bahaya arcing dan flashover: Terjadinya loncatan listrik antar konduktor atau ke struktur logam di sekitarnya.
3. Bahaya jatuh dari ketinggian: Karena pekerjaan dilakukan pada tiang dan struktur distribusi listrik.
4. Risiko kelelahan dan stres kerja: Kegiatan ini membutuhkan konsentrasi tinggi, fokus mental, dan fisik yang prima.

Identifikasi bahaya ini menjadi dasar dalam penyusunan langkah pengendalian risiko sebelum pekerjaan dilaksanakan.

2.5.3 Alat Pelindung Diri (APD) dan Standar Penggunaan

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) pada sistem distribusi tenaga listrik merupakan metode pemeliharaan jaringan yang dilakukan tanpa memadamkan aliran listrik guna menjaga kontinuitas pelayanan kepada pelanggan. Dalam praktiknya, pekerjaan ini memiliki tingkat risiko tinggi karena pekerja berinteraksi langsung dengan konduktor bertegangan pada jaringan distribusi tegangan menengah (20 kV). Oleh karena itu, penerapan sistem keselamatan kerja yang ketat, termasuk penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), menjadi persyaratan mutlak.

Dalam konteks nasional, kewajiban penggunaan APD diatur dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2010 tentang Alat Pelindung Diri, yang menyatakan bahwa pengusaha wajib menyediakan APD sesuai dengan potensi bahaya dan memastikan penggunaannya oleh tenaga kerja. Ketentuan ini menjadi landasan hukum umum bagi seluruh aktivitas pekerjaan berisiko tinggi, termasuk PDKB distribusi.

Secara teknis operasional, pelaksanaan PDKB di lingkungan PT PLN (Persero) mengacu pada standar internal perusahaan yang tertuang dalam dokumen Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) serta Pedoman Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) PLN. Dalam standar tersebut ditegaskan bahwa setiap personel PDKB wajib menggunakan APD sesuai metode kerja yang digunakan, baik metode sentuh langsung (*barehand method*), metode berjarak (*hot stick method*), maupun metode berpelindung (*insulated platform method*).

Pada pekerjaan PDKB distribusi metode sentuh langsung, sarung tangan isolasi harus memenuhi klasifikasi tegangan kerja sesuai standar internasional seperti IEC 60903, dan disesuaikan dengan sistem tegangan 20 kV yang umum digunakan pada jaringan distribusi PLN. Selain itu, sarung tangan wajib melalui pengujian berkala (*periodic dielectric test*) sebagaimana diatur dalam prosedur inspeksi peralatan PDKB PLN.

Baju kerja yang digunakan harus berbahan tahan api (*flame resistant*) untuk mengantisipasi potensi *arc flash*. Dalam pedoman teknis keselamatan kerja kelistrikan PLN, pakaian kerja PDKB harus memiliki nilai proteksi termal yang memadai terhadap energi insiden busur listrik sesuai hasil analisis risiko pekerjaan. Hal ini selaras dengan pendekatan manajemen risiko kelistrikan yang diterapkan dalam sistem K3 PLN.

Helm keselamatan berstandar industri yang dilengkapi *face shield* wajib digunakan untuk melindungi kepala dan wajah dari bahaya mekanis serta percikan busur listrik. Dalam SPLN terkait keselamatan kerja jaringan distribusi, helm yang digunakan pada pekerjaan bertegangan harus memiliki ketahanan terhadap tegangan listrik dan memenuhi standar nasional (SNI) maupun standar internasional yang diakui.

Sepatu isolasi juga merupakan bagian dari sistem proteksi terhadap bahaya sentuhan tidak langsung (*indirect contact*). Dalam pedoman PDKB distribusi, sepatu harus memiliki sol isolator dengan resistansi listrik yang memadai guna mencegah terbentuknya jalur arus ke tanah melalui tubuh pekerja. Untuk pekerjaan pada tiang distribusi atau konstruksi jaringan udara, penggunaan *full body harness* menjadi kewajiban tambahan.

Standar keselamatan PLN mengharuskan penggunaan sistem penahan jatuh (*fall protection system*) yang memenuhi standar keselamatan kerja ketinggian guna mencegah kecelakaan akibat terjatuh selama pekerjaan. Dengan demikian, integrasi antara regulasi nasional (Permenaker), standar teknis internasional (IEC/IEEE), serta Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) menunjukkan bahwa penggunaan APD pada PDKB distribusi merupakan bagian dari sistem manajemen keselamatan kerja yang terstruktur dan berbasis risiko. Implementasi standar tersebut tidak hanya bertujuan memenuhi kewajiban regulatif, tetapi juga untuk menjamin keberlangsungan operasi distribusi tenaga listrik secara aman, andal, dan berkelanjutan.