

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

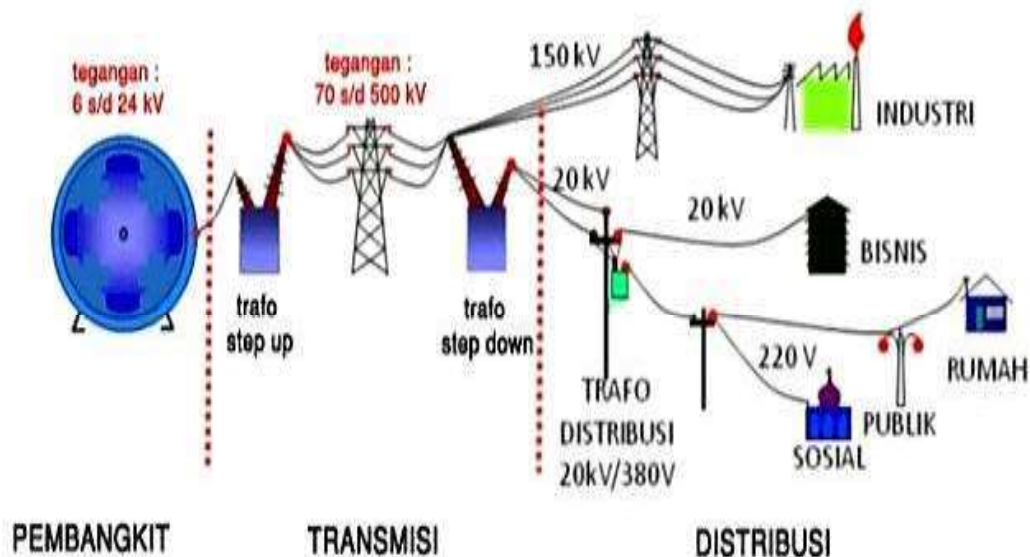
2.1.1. Sistem Kelistrikan

Sistem kelistrikan merupakan jaringan terintegrasi yang terdiri atas tiga komponen utama Pembangkitan, Transmisi, dan Distribusi. Ketiga komponen ini berfungsi secara sinergis untuk memastikan energi listrik dapat disalurkan dari sumber ke konsumen secara efisien dan andal. Sistem kelistrikan juga mencakup peralatan dan infrastruktur pendukung, seperti transformator, saluran udara, dan kabel bawah tanah. Komponen Utama Sistem Kelistrikan[4]

Komponen Utama Sistem Kelistrikan terdiri dari :

Pembangkitan

Proses yang menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber energi primer, seperti bahan bakar fosil, tenaga air, angin, atau matahari. Pembangkit listrik pada umumnya menghasilkan energi listrik pada tegangan rendah atau menengah yang kemudian dinaikkan menggunakan transformator untuk transmisi.[5]



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Pusat pembangkit tenaga listrik umumnya dibangun di lokasi yang jauh dari area pemukiman, kawasan industri, maupun daerah komersial. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem penyaluran energi listrik untuk menyalurkan daya dari pembangkit menuju konsumen akhir. Sistem penyaluran ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu sistem transmisi dan sistem distribusi listrik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1. Kedua sistem tersebut saling terhubung dan membentuk satu kesatuan dalam jaringan penyaluran tenaga listrik. Perbedaan mendasar antara keduanya terletak pada tingkat tegangan listrik yang dialirkan melalui masing-masing sistem.

Transmisi

merupakan Penyalur energi listrik dari Pembangkit ke pusat beban melalui saluran Transmisi Tegangan Tinggi (HV) atau ekstra tinggi (EHV).[6] Sistem transmisi menggunakan tegangan tinggi untuk mengurangi rugi daya akibat resistansi penghantar. Sistem transmisi tenaga listrik berfungsi menyalurkan Energi listrik dari pusat Pembangkit menuju Gardu Induk utama (main substation). Umumnya, jarak antara pembangkit dan gardu induk cukup jauh, dalam rentang antara 300 km hingga 3000 km. Jarak yang panjang tersebut menimbulkan potensi rugi-rugi energi listrik, salah satunya berupa kehilangan daya akibat pelepasan panas. Untuk mengurangi rugi-rugi daya selama proses penyaluran, salah satu metode yang digunakan adalah dengan meningkatkan Tegangan Listrik.[7] Pada sistem transmisi, tegangan yang digunakan dapat mencapai 550 kV. Sementara itu, tegangan keluaran dari generator biasanya berada pada kisaran 15 kV hingga 25 kV, yang tergolong rendah untuk penyaluran jarak jauh. Daya listrik ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu tegangan (V) dan arus (I), dengan hubungan:

$$P = V \times I$$

Dengan nilai daya yang konstan, tegangan yang rendah akan menyebabkan arus yang mengalir menjadi besar. Arus yang tinggi akan meningkatkan rugi-rugi daya karena besarnya panas (I^2R losses) yang timbul pada penghantar. Oleh karena itu, tegangan keluaran dari generator dinaikkan menggunakan transformator penaik tegangan (step-up transformer) sebelum disalurkan ke jaringan transmisi. Setelah mencapai tegangan tinggi, energi listrik ditransmisikan melalui saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) atau overhead transmission lines, seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 2 Overhead lines

Saluran transmisi udara (overhead lines) umumnya tersusun atas tiga komponen utama, yaitu konduktor, isolator, dan menara transmisi (tower).

- a. Konduktor berfungsi sebagai media penghantar energi listrik. Bahan yang digunakan umumnya berupa paduan aluminium karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan bobot yang relatif ringan.
- b. Isolator berfungsi untuk memisahkan konduktor dari struktur menara, mencegah terjadinya kebocoran arus, serta mengurangi rugi-rugi energi akibat pelepasan panas.
- c. Seluruh komponen ini dirancang agar proses transmisi berlangsung aman, efisien, dan tidak membahayakan lingkungan di sekitarnya.

Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan komponen utama dalam jaringan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber daya besar (bulk power source) hingga mencapai konsumen akhir. Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik umumnya memiliki tegangan keluaran antara 11 kV hingga 24 kV.[8] Tegangan tersebut kemudian dinaikkan melalui Gardu Induk (GI) dengan menggunakan

transformator penaik tegangan (step-up transformer) hingga mencapai level 70 kV, 154 kV, 220 kV, bahkan 500 kV, agar dapat ditransmisikan melalui jaringan saluran transmisi jarak jauh. Tujuan utama peningkatan tegangan ini adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya listrik selama proses pengaliran. Hal ini karena kerugian daya listrik berbanding lurus dengan kuadrat arus (I^2R losses). Dengan meningkatkan tegangan, arus yang mengalir menjadi lebih kecil, sehingga energi yang hilang dalam bentuk panas pada pengantar dapat diminimalkan dan efisiensi penyaluran daya menjadi lebih tinggi[9]

2.1.2 Jaringan Distribusi

Jaringan Sistem Distribusi Primer

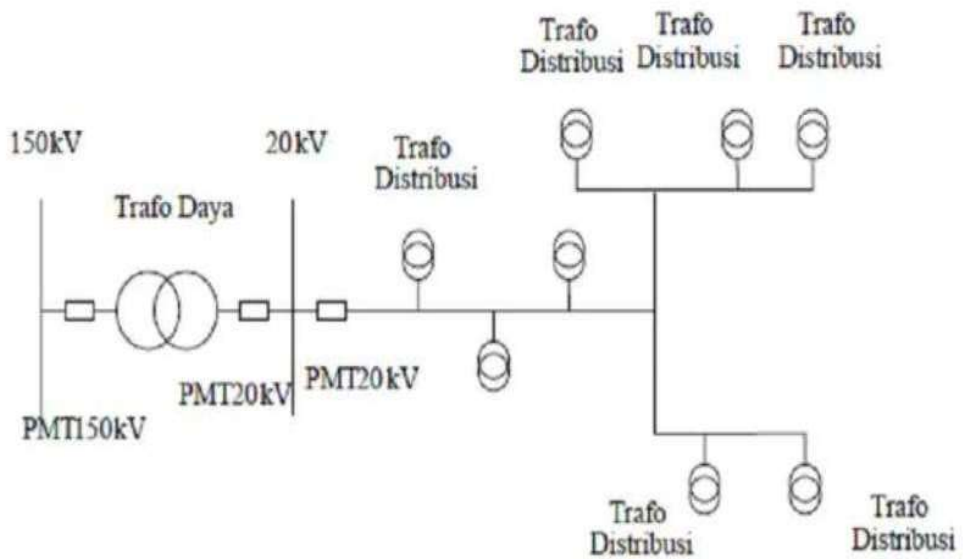
Pada sistem distribusi tegangan menengah (primer 20 kV), jaringan dapat dibedakan menjadi beberapa konfigurasi utama, yaitu jaringan radial, jaringan dengan hantaran penghubung (tie line), jaringan lingkaran (loop), jaringan spindel, serta sistem gugus atau kluster. [10]

Jaringan Radial

Jaringan radial merupakan bentuk konfigurasi sistem distribusi primer yang paling sederhana dan ekonomis dalam hal pembangunan maupun pengoperasian. [11]

Pada sistem ini, terdapat sejumlah penyulang (feeder) yang menyalurkan energi listrik ke beberapa gardu distribusi melalui satu arah aliran daya secara radial dari sumber utama. Meskipun efisien dari sisi biaya, sistem radial memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan jenis jaringan lainnya. Hal ini disebabkan oleh adanya satu jalur utama penyulang yang menjadi sumber pasokan bagi seluruh gardu distribusi. Apabila terjadi gangguan pada jalur utama tersebut, maka seluruh gardu yang terhubung akan mengalami pemadaman.

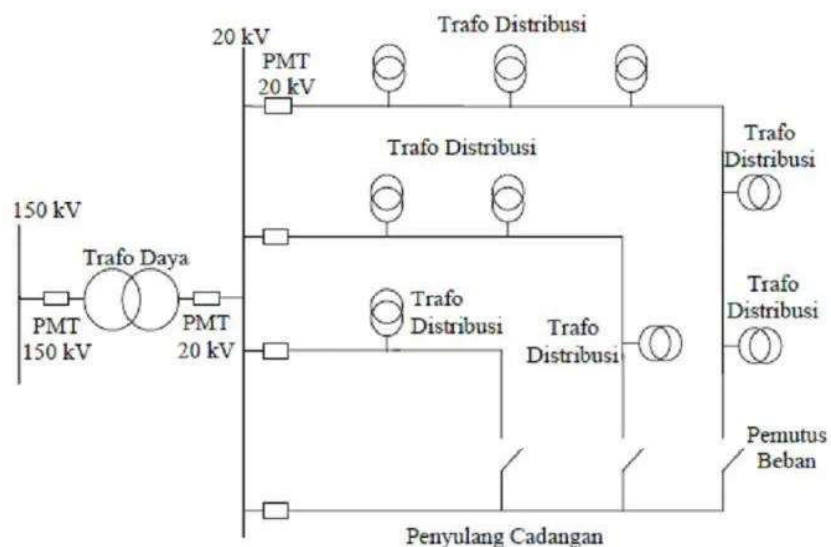
Selain itu, kelemahan lain dari sistem radial adalah kualitas tegangan yang kurang stabil pada gardu distribusi di ujung jaringan, karena mengalami penurunan tegangan (voltage drop) yang paling besar akibat panjangnya saluran dan beban yang terletak jauh dari sumber.



Gambar 2. 3 Jaringan Distribusi Radial

Jaringan Hantaran Penghubung (Tie Line)

Jaringan Tie Line (saluran penghubung), seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4, umumnya diterapkan pada pelanggan dengan tingkat prioritas tinggi yang tidak diperbolehkan mengalami pemadaman listrik, seperti bandar udara, rumah sakit, dan fasilitas vital lainnya.

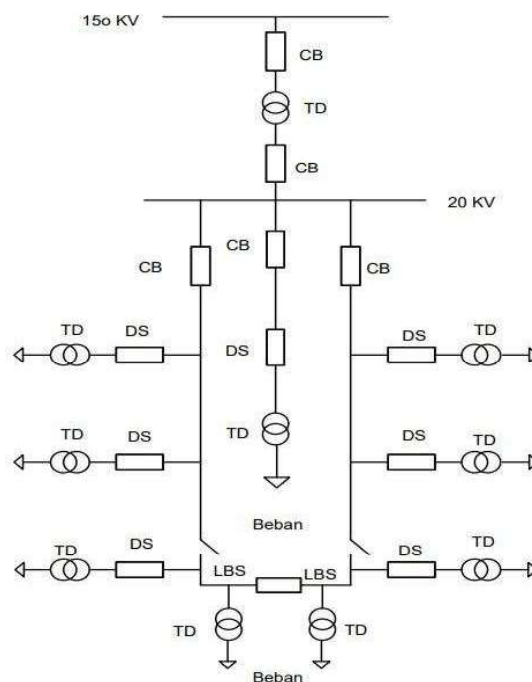


Gambar 2. 4 Tie Line

Jaringan Loop

Tipe jaringan ini merupakan konfigurasi distribusi primer yang merupakan gabungan dari dua sistem radial, di mana pada ujung masing-masing jaringan dipasang Pemutus Tenaga (PMT). Dalam kondisi operasi normal, jaringan ini berfungsi seperti sistem radial biasa. Namun, ketika terjadi gangguan pada salah satu sisi, PMT dapat dioperasikan untuk melokalisir gangguan, sehingga bagian jaringan lainnya tetap dapat beroperasi.

Dibandingkan dengan sistem radial murni, tipe Tie Line memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dalam penyaluran energi listrik. Meskipun demikian, sistem ini memerlukan biaya investasi yang lebih besar karena kompleksitas peralatan dan sistem pengamanannya yang lebih tinggi.



Gambar 2. 5 Loop Jaringan

Jaringan Spindel

Sistem Spindle merupakan jenis jaringan distribusi yang menggunakan express feeder pada bagian tengahnya, yang terhubung langsung antara gardu induk dengan gardu hubung. Konfigurasi ini menjadikan sistem Spindle termasuk sistem yang memiliki

tingkat keandalan tinggi dalam penyaluran tenaga listrik.

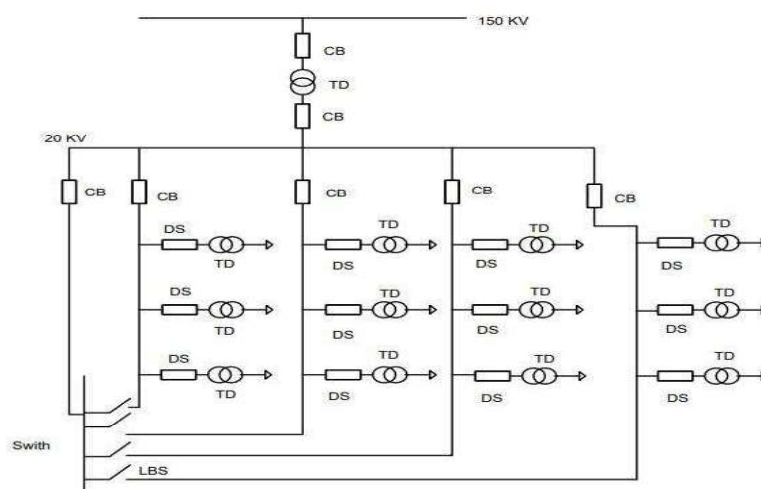
Jaringan Spindle merupakan kombinasi antara sistem radial dan sistem rangkaian terbuka (open loop). Setiap titik beban dalam jaringan ini memiliki alternatif penyulang cadangan, sehingga apabila salah satu penyulang mengalami gangguan, penyaluran daya dapat segera dialihkan ke penyulang lainnya. Dengan mekanisme ini, kontinuitas suplai listrik tetap terjaga dan gangguan dapat diminimalisir.

Selain itu, pada bagian tengah penyulang umumnya dipasang gardu tengah, yang berfungsi sebagai titik manuver (switching point) untuk memudahkan pengoperasian sistem ketika terjadi gangguan pada jaringan distribusi.

Sistem Cluster

Sistem Gugus (Cluster) memiliki karakteristik yang hampir serupa dengan sistem Spindle, namun terdapat perbedaan utama pada tidak digunakannya gardu hubung atau gardu switching di dalam konfigurasinya. Pada sistem ini, express feeder langsung terhubung dari gardu induk menuju setiap jaringan distribusi tanpa melalui gardu perantara.

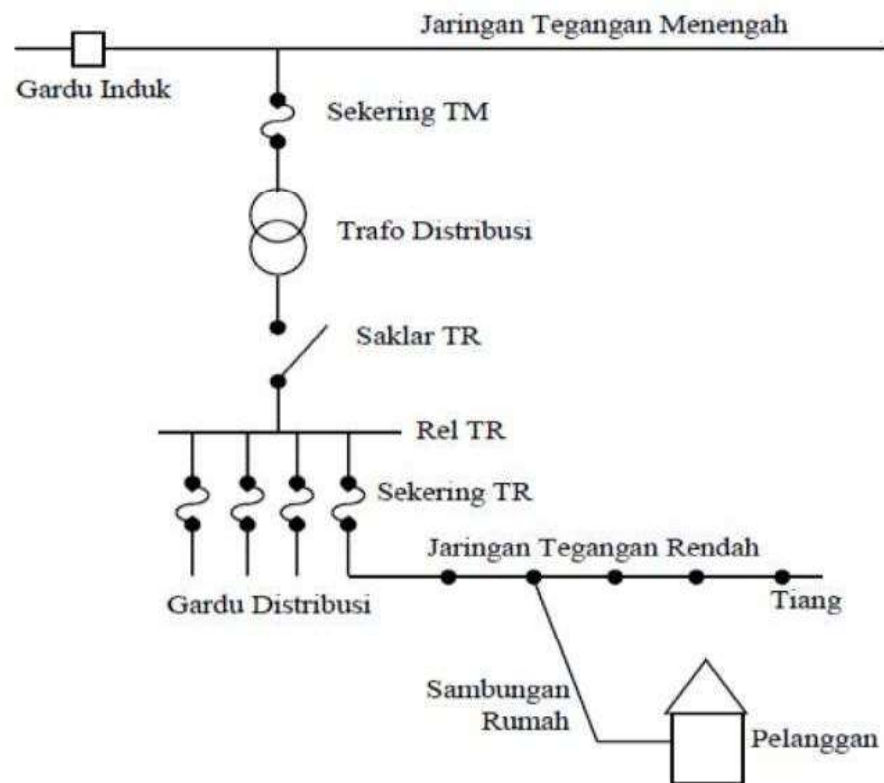
Fungsi express feeder dalam sistem ini adalah sebagai titik manuver (manuver point) yang dapat dioperasikan ketika terjadi gangguan pada salah satu bagian jaringan. Dengan demikian, suplai listrik dapat segera dialihkan, sehingga keandalan dan kontinuitas penyaluran daya listrik tetap terjaga meskipun terjadi gangguan pada sebagian jaringan.



Gambar 2. 6 Cluster Jaringan

Jaringan Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.8 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2. 7 Hubungan TM ke TR Konsumen

Sistem distribusi sekunder berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi menuju beban-beban milik konsumen. Pada sistem ini, bentuk jaringan yang paling umum digunakan adalah sistem radial, karena lebih sederhana dan efisien dalam pengoperasian. Saluran distribusi sekunder dapat menggunakan kabel berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi, tergantung pada kondisi lingkungan dan kebutuhan instalasi.

Dari segi lokasi dan fungsi, sistem distribusi sekunder merupakan bagian jaringan yang berhubungan langsung dengan konsumen. Oleh karena itu, sistem ini tidak hanya berperan sebagai penerima daya listrik dari transformator distribusi, tetapi juga

bertanggung jawab dalam menyalurkan dan mendistribusikan daya tersebut ke pelanggan akhir. Karena berhubungan langsung dengan konsumen, kualitas tegangan dan kontinuitas penyaluran listrik pada sistem ini harus dijaga dengan baik agar pelayanan listrik tetap optimal.

Penyaluran daya listrik pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) terbagi menjadi Dua jenis utama, yaitu :

2.1.3 Jaringan Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)

Pada sistem ini, jenis penghantar yang digunakan adalah kabel telanjang tanpa isolasi, seperti kabel AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) dan kabel ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced). Jaringan Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR)

Sistem ini menggunakan kabel berisolasi, seperti LVTC (Low Voltage Twisted Cable). Ukuran kabel LVTC yang umum digunakan antara lain $2 \times 10 \text{ mm}^2$, $2 \times 16 \text{ mm}^2$, $4 \times 25 \text{ mm}^2$, $3 \times 35 \text{ mm}^2$, $3 \times 50 \text{ mm}^2$, dan $3 \times 70 \text{ mm}^2$.

Berdasarkan SPLN No. 3 Tahun 1987, Jaringan Tegangan Rendah mencakup seluruh bagian sistem penyaluran beserta perlengkapannya, mulai dari sumber tegangan rendah hingga ke alat pembatas atau pengukur (kWh meter) di sisi pelanggan. Sementara itu, STR (Saluran Tegangan Rendah) merupakan bagian dari Jaringan Tegangan Rendah yang tidak termasuk sambungan pelayanan, yakni bagian penghubung antara STR dan alat pembatas/pengukur di sisi konsumen.

2.1.4 Saluran Udara Tegangan Menengah

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) merupakan jenis konstruksi jaringan distribusi yang paling ekonomis dalam proses penyaluran energi listrik untuk kapasitas daya tertentu. Di Indonesia, sistem ini menjadi tipe jaringan yang paling banyak digunakan pada pelanggan tegangan menengah. Ciri khas dari SUTM adalah penggunaan penghantar telanjang (bare conductor) yang dipasang dan ditopang oleh isolator pada tiang beton atau tiang besi. Karena penghantarnya tidak memiliki lapisan isolasi, maka aspek keselamatan ketenagalistrikan harus sangat diperhatikan. Hal ini meliputi jarak

aman minimum antara penghantar bertegangan 20 kV terhadap fase lain, bangunan, pepohonan, maupun jangkauan manusia, agar tidak menimbulkan potensi bahaya listrik

Komponen Saluran Udara Tegangan Menengah

SUTM terdiri atas beberapa komponen utama yang berfungsi secara terpadu untuk menyalurkan daya listrik dengan aman dan andal. Komponen-komponen tersebut meliputi:

Penghantar / Konduktor

Penghantar berperan sebagai media utama penyaluran arus listrik dari satu titik ke titik lainnya. Jenis penghantar yang umum digunakan pada jaringan tegangan menengah antara lain sebagai berikut:

Penghantar AAAC

Jenis konduktor ini terbuat dari aluminium murni atau paduan aluminium (All Aluminium Alloy Conductor – AAAC) yang dipilin berbentuk bulat padat. Standar material dan konstruksinya mengacu pada SPLN 4-1:1986 dan SPLN 74:1987. Penghantar jenis ini memiliki konduktivitas tinggi, berat yang ringan, dan tahan terhadap korosi, sehingga banyak digunakan untuk jaringan udara tegangan menengah di berbagai wilayah.



Gambar 2. 8 Alumunium Alloy Conductor

Penghantar Berisolasi Setengah AAAC-S

Jenis penghantar ini menggunakan aluminium sebagai bahan utama yang kemudian

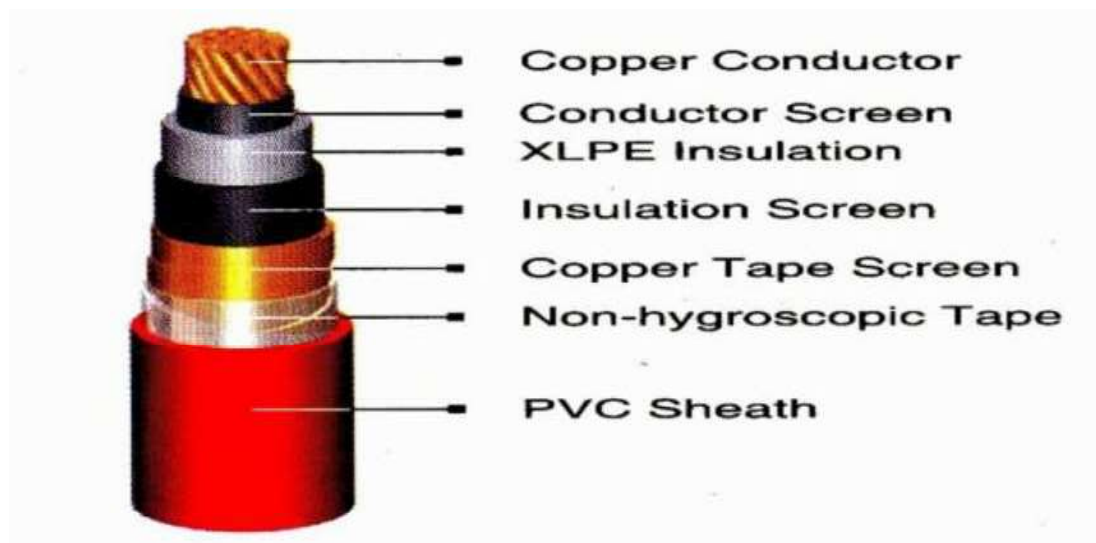
dilapisi dengan material isolasi XLPE (Cross-Linked Polyethylene). Lapisan isolasi ini berfungsi untuk meningkatkan ketahanan listrik dan mekanis penghantar, sekaligus mengurangi risiko gangguan akibat sentuhan atau hubungan singkat dengan benda di sekitarnya. Penghantar berisolasi XLPE dirancang untuk tegangan kerja hingga 6 kV.



Gambar 2. 9 All Aluminium Alloy Conductor

Penghantar Berisolasi Penuh (There Single Core)

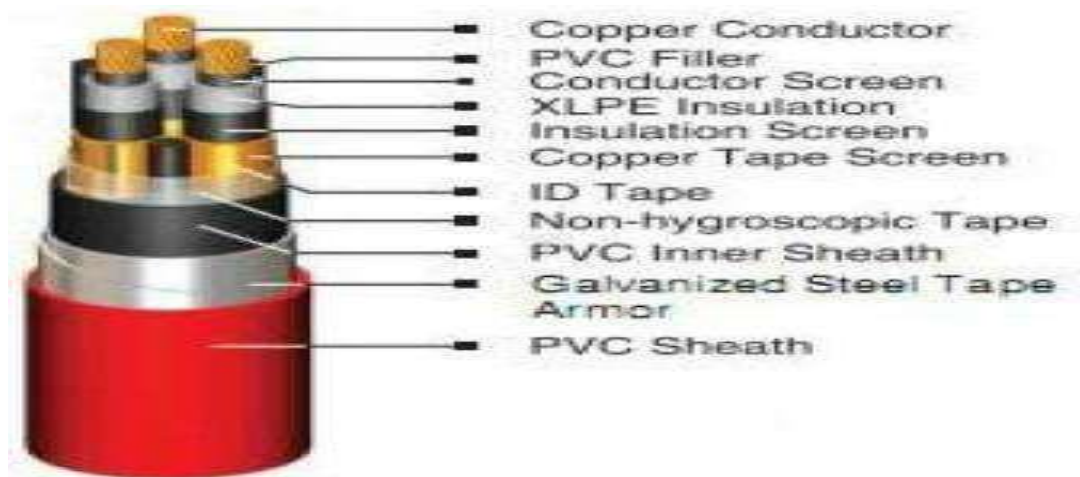
Jenis penghantar ini terbuat dari konduktor berbahan aluminium berisolasi XLPE yang dilapisi selubung luar berbahan PVC (Polyvinyl Chloride) serta dilengkapi penghantar baja sebagai penyangga mekanis. Konduktor ini memiliki tegangan 12/20 (24) kV dan dirancang untuk penggunaan pada Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM). Karena memiliki isolasi penuh, penghantar tipe ini memberikan tingkat keamanan dan keandalan yang lebih tinggi dibandingkan konduktor telanjang, serta mengurangi risiko gangguan akibat sentuhan langsung atau kondisi lingkungan, seperti pepohonan dan hewan.[12]



Gambar 2. 10 Kabel SKTM Berinti Tunggal

Kabel bawah tanah Tegangan Menengah berinti tiga

Kabel jenis ini terdiri dari tiga inti penghantar yang terbuat dari tembaga atau aluminium, di mana setiap inti dilengkapi dengan lapisan tabir konduktor berbahan semi-konduktif. Masing-masing inti juga dibungkus dengan isolasi XLPE (Cross-Linked Polyethylene) serta tabir isolasi tambahan untuk meningkatkan ketahanan listrik antar inti. Sebagai perlindungan mekanis, kabel ini dilengkapi dengan lapisan pelindung logam berupa pita tembaga spiral yang saling menumpuk rapat, disertai pelindung bagian dalam berbahan PVC, kemudian diperkuat dengan lapisan baja galvanis bundar dan pita baja, serta selubung luar berlapis PVC sebagai pelindung akhir terhadap pengaruh lingkungan. Kabel tiga inti ini dirancang untuk tegangan nominal 12/20 kV dengan tegangan maksimum operasi hingga 24 kV, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem jaringan distribusi tegangan menengah yang memerlukan ketahanan mekanis dan keandalan isolasi tinggi.



Gambar 2. 11 Kabel SKTM Berinti Tiga

Tiang

Tiang berfungsi sebagai penyangga penghantar agar posisi kawat tetap berada di atas permukaan tanah dengan jarak aman sesuai ketentuan keselamatan ketenagalistrikan. Tiang harus memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban tarik dan tekan yang timbul dari tegangan mekanis penghantar, tekanan angin, serta beban tambahan lainnya. Berdasarkan jenis materialnya, tiang SUTM umumnya dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Tiang Kayu, digunakan pada jaringan sementara atau daerah tertentu dengan kebutuhan beban ringan.
2. Tiang Besi, memiliki kekuatan tarik tinggi dan tahan terhadap deformasi mekanis.
3. Tiang Beton, merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena daya tahannya tinggi, biaya perawatan rendah, dan tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

Isolator Tegangan Menengah

Isolator berfungsi untuk memisahkan penghantar bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan seperti tiang penopang atau traves, serta menahan gaya mekanis dari konduktor.

Pada jaringan SUTM (20 kV), isolator dibedakan berdasarkan fungsi dan posisi pemasangannya pada tiang atau konstruksi jaringan. :

Isolator Pin

Digunakan untuk menopang dan mengisolasi konduktor pada jaringan dengan posisi tegak di atas traves atau lengan tiang.



Gambar 2. 12 Isolator Pin

Isolator Tarik (Strain Insulator / Tension Insulator)



Gambar 2. 13 Isolator Tarik

Gangguan pada Jaringan SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)

Gangguan pada Jaringan SUTM adalah kondisi tidak normal yang terjadi pada sistem distribusi listrik sehingga menyebabkan perubahan arus atau tegangan yang tidak sesuai dengan standar operasional sistem. Gangguan ini dapat mengakibatkan pemadaman listrik, kerusakan peralatan, maupun penurunan keandalan sistem distribusi. Menurut IEEE Std 493-2007, gangguan listrik adalah setiap kejadian yang menyebabkan

terjadinya penyimpangan terhadap kondisi normal sistem tenaga listrik, baik berupa arus lebih, tegangan lebih, maupun gangguan hubung singkat antar fasa atau ke tanah. Secara umum, gangguan pada jaringan SUTM dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu gangguan permanen dan gangguan Sesaat (temporer).

1. Gangguan Sesaat (temporer)

Gangguan yang terjadi pada waktu singkat dan hilang dengan sendirinya tanpa perlu tindakan pemadaman.

Biasanya disebabkan oleh :

- a. Sentuhan sementara antara konduktor dengan ranting pohon.
- b. Binatang (burung, kelelawar, tupai) menyentuh konduktor.
- c. Lonjakan tegangan akibat sambaran petir.
- d. Gangguan ini sering memicu kerja proteksi seperti recloser.

2. Gangguan menetap (permanen)

gangguan pada sistem yang tidak dapat hilang dengan sendirinya dan memerlukan penanganan langsung oleh petugas untuk memulihkan sistem.

Penyebab umum antara lain :

- a. Putusnya konduktor.
- b. Kerusakan isolator.
- c. Tiang roboh atau miring akibat kecelakaan atau cuaca ekstrem.
- d. Gangguan antara fasa atau antara fasa dengan tanah.

Pemeliharaan Jaringan SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)

Pemeliharaan Jaringan SUTM merupakan kegiatan yang terencana dan berkesinambungan untuk menjaga kondisi jaringan tetap andal, aman, serta berfungsi sebagaimana mestinya. Tujuan utama pemeliharaan adalah mencegah terjadinya gangguan, memperpanjang umur peralatan, dan meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik.[13]

Menurut PLN Distribution Code dan SPLN No. 59-1:1985, pemeliharaan jaringan distribusi adalah kegiatan yang mencakup pemeriksaan, perbaikan, penggantian, dan penyempurnaan peralatan jaringan listrik agar tetap beroperasi sesuai standar teknis yang ditetapkan.

Tujuan pemeliharaan

Tujuan dari pelaksanaan pemeliharaan jaringan SUTM antara lain:

1. Menjamin kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan.
2. Mengurangi frekuensi dan durasi gangguan (SAIFI dan SAIDI).
3. Menjaga keselamatan kerja dan keandalan sistem.
4. Memastikan peralatan bekerja pada kondisi optimal.
5. Mencegah kerusakan berat yang dapat menimbulkan ENS (Energy Not Supplied).

Tujuan pemeliharaan Tujuan dari kegiatan pemeliharaan adalah sebagai berikut:

1. Menjaga kinerja peralatan.
2. Meningkatkan usia peralatan.
3. Meminimalkan risiko kerusakan.
4. Mengembalikan kondisi peralatan seperti semula..
5. Mengurangi kerugian secara ekonomis akibat gangguan atau kerusakan.
6. Memberikan keyakinan terhadap keandalan operasi sistem distribusi

Jenis Pemeliharaan

pemeliharaan SUTM dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu:

1. Pemeliharaan Preventif (Preventive Maintenance)
Kegiatan yang dilakukan secara berkala berdasarkan jadwal tertentu untuk mencegah terjadinya gangguan. Contoh: pemeriksaan visual isolator, pengecekan kekencangan baut, pemangkasan pohon, pengujian arrester, dan pembersihan peralatan. Tujuannya agar potensi gangguan dapat diketahui sebelum menyebabkan kerusakan..
2. Pemeliharaan korektif (Preventive Maintenance)
Merupakan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadinya gangguan atau kerusakan. Contoh: perbaikan isolator pecah, penggantian konduktor putus, atau perbaikan tiang roboh. Sifatnya reaktif, dilakukan setelah terjadi masalah.
3. Pemeliharaan Prediktif (Predictive Maintenance)
Pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan hasil pemantauan kondisi peralatan (condition based maintenance) menggunakan alat ukur atau sistem sensor.

Contoh: pemeriksaan suhu sambungan dengan thermovision, pengukuran tahanan isolasi, dan analisa arus bocor. Pendekatan ini lebih efisien karena tindakan dilakukan berdasarkan kondisi nyata peralatan.

2.1.5 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB)

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) adalah suatu metode pelaksanaan pekerjaan pada jaringan listrik yang mencakup kegiatan pemeliharaan, modifikasi, serta rehabilitasi, di mana jaringan tetap dalam kondisi bertegangan selama pekerjaan berlangsung. Dengan penerapan metode ini, kegiatan pemeliharaan atau perbaikan dapat dilakukan tanpa harus memadamkan aliran listrik, sehingga konsumen PLN tetap dapat menikmati pasokan listrik secara terus-menerus meskipun sedang dilakukan pekerjaan pada jaringan distribusi maupun transmisi.. Layaknya satuan khusus dalam dunia militer yang memiliki kemampuan tempur dan strategi tingkat tinggi, PT PLN (Persero) juga memiliki unit khusus yang ditugaskan untuk menangani pekerjaan berisiko tinggi pada sistem kelistrikan. Unit ini dikenal dengan nama Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) yang terdiri dari tenaga-tenaga profesional pilihan dengan kompetensi, keterampilan, serta ketahanan fisik dan mental yang terlatih.

Pasukan PDKB memiliki kemampuan untuk melakukan pekerjaan pemeliharaan, perbaikan, dan penggantian komponen jaringan listrik seperti isolator, konduktor, maupun peralatan pendukung lainnya, tanpa harus memutus aliran listrik pada jaringan tersebut. Dengan demikian, kegiatan operasional kelistrikan dapat tetap berlangsung tanpa mengganggu kontinuitas pelayanan kepada pelanggan.

Peran PDKB sangat penting sebagai garda terdepan PLN dalam menjaga keandalan sistem distribusi dan transmisi listrik, serta memastikan masyarakat tetap dapat menikmati energi listrik secara berkesinambungan, aman, dan berkualitas tinggi, meskipun sedang dilakukan pekerjaan pada jaringan bertegangan.

Berikut beberapa jenis Metode PDKB sebagai berikut.

a. Metode Sentuh Langsung

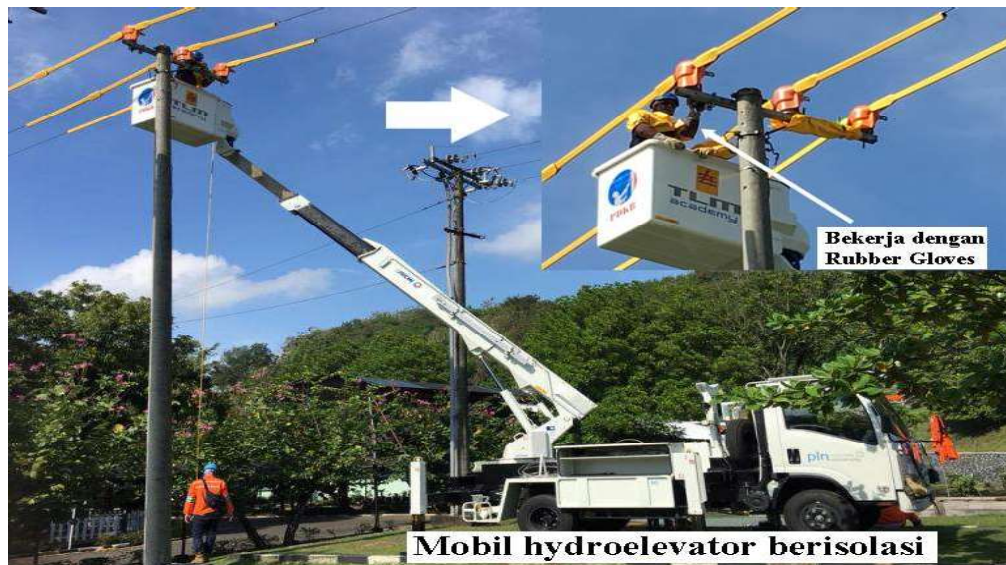
Metode sentuh langsung merupakan salah satu teknik pekerjaan dalam keadaan bertegangan (PDKB) yang memungkinkan pekerja melakukan kontak langsung dengan konduktor bertegangan tinggi. Prinsip dasar dari

metode ini berawal dari penemuan Michael Faraday pada tahun 1837, yang menemukan bahwa suatu ruang tertutup yang terbuat dari bahan konduktif dapat menghalangi medan listrik statis dari luar. Fenomena ini dikenal sebagai prinsip Sangkar Faraday (Faraday Cage). Ketika suatu benda konduktif menerima medan listrik eksternal, muatan di permukaannya akan menyesuaikan diri sedemikian rupa sehingga medan listrik di bagian dalam ruang tertutup menjadi nol. Berdasarkan teori ini, pekerja dapat “bermuatan” sama dengan konduktor yang sedang bertegangan tanpa mengalami sengatan listrik, asalkan tubuhnya terlindungi oleh sistem pelindung yang menjaga agar tidak terjadi perbedaan potensial. Dalam praktik metode *barehand*, pekerja secara langsung berada pada potensial yang sama dengan konduktor bertegangan. Oleh karena itu, sebelum menyentuh konduktor, pekerja terlebih dahulu disetarakan potensialnya dengan konduktor tersebut menggunakan tongkat penyeimbang potensial (*equipotential stick*).

Untuk menjamin keselamatan, pekerja wajib menggunakan alat pelindung diri (APD) berisolasi, seperti :

1. Sarung tangan isolasi
2. Sarung lengan isolasi
3. Sepatu kerja berisolasi
4. Mobil kerja berisolasi (*insulated aerial lift*).

Dengan perlengkapan tersebut, pekerja dapat melaksanakan kegiatan pemeliharaan atau perbaikan pada jaringan tegangan tinggi tanpa perlu memadamkan aliran listrik, sehingga kontinuitas penyaluran daya tetap terjaga.



Gambar 2. 14 PDKB TM Sentuh Langsung

b. Metode Berjarak

Metode Hot Stick merupakan salah satu teknik pekerjaan dalam keadaan bertegangan di mana petugas bekerja dari posisi yang terisolasi secara aman dari konduktor bertegangan. Pada metode ini, pekerja tidak melakukan kontak langsung dengan penghantar listrik, melainkan menggunakan peralatan khusus berupa tongkat berisolasi (hot stick) untuk melakukan operasi, perbaikan, atau pemeliharaan pada jaringan listrik. [14] Peralatan hot stick memiliki panjang tertentu yang disesuaikan dengan tingkat tegangan sistem, sehingga jarak aman antara pekerja dan konduktor tetap terjaga. Bahan utama tongkat ini adalah Fiberglass Reinforced Plastic (FRP), yaitu plastik yang diperkuat dengan serat kaca, yang memiliki sifat isolasi listrik tinggi, ringan, dan kuat secara mekanis. Metode ini dapat pula digunakan secara kombinasi dengan metode barehand, selama kedua metode tersebut diterapkan dengan benar dan saling mendukung untuk meningkatkan efisiensi serta keselamatan kerja. [15]



Gambar 2. 15 PDKB TM Berjarak

2.1.7 SAIDI dan SAIFI

Keandalan (reliability) merupakan ukuran sejauh mana suatu sistem atau komponen mampu beroperasi dengan baik dalam jangka waktu tertentu dan pada kondisi yang telah ditentukan. Sistem tenaga listrik dikatakan andal apabila mampu menyediakan energi listrik secara terus-menerus dengan mutu tegangan dan frekuensi yang sesuai standar. Untuk mengetahui tingkat keandalan suatu sistem, dilakukan evaluasi kinerja operasional melalui perhitungan dan analisis terhadap data gangguan atau pemadaman dalam waktu tertentu, kemudian dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan. , keandalan diartikan sebagai kemampuan sistem penyaluran tenaga listrik untuk menyediakan tegangan yang tersedia secara terus-menerus dan mencukupi dengan mutu yang memuaskan, sesuai dengan kebutuhan pelanggan.[16]

2.1.8 Penurunan susut jaringan pada pemakaian tenaga listrik

Listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Kebutuhan ini dirasakan mulai dari wilayah perkotaan hingga daerah terpencil sebagai penunjang berbagai aktivitas. Dengan adanya listrik, pelaksanaan kegiatan menjadi lebih

mudah dan efisien. Oleh karena itu, diperlukan penertiban penggunaan tenaga listrik guna menjamin keselamatan masyarakat dari potensi bahaya listrik, meningkatkan kualitas pelayanan, serta menekan susut non-teknis yang disebabkan oleh penggunaan tenaga listrik secara tidak sah.

Susut pada jaringan distribusi terbagi menjadi dua jenis, yaitu susut teknis dan susut nonteknis. Susut teknis disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain umur transformator, luas penampang kabel, arus netral yang terlalu besar, kualitas konektor yang kurang baik, serta panjang jaringan distribusi yang berlebihan. Sementara itu, susut nonteknis disebabkan oleh kesalahan pembacaan meter pelanggan, penggunaan tenaga listrik secara tidak sah, serta adanya penerangan jalan umum ilegal.

Penurunan susut pada jaringan distribusi dapat dilakukan melalui penertiban pemakaian tenaga listrik. Sebelum digunakan oleh konsumen, energi listrik pada jaringan distribusi dialirkan ke APP (Alat Pembatas dan Pengukur) berupa meter pelanggan, kemudian dimanfaatkan untuk kebutuhan sehari-hari. Operasional penertiban pemakaian tenaga listrik di PLN merupakan kegiatan yang dilakukan untuk mencegah dan meminimalkan kerugian yang dapat terjadi. Namun, dalam praktiknya, keakuratan pengukuran energi listrik pada APP masih menghadapi beberapa kendala, seperti kesalahan pembacaan kWh meter, pencurian listrik, pemakaian listrik yang tidak terukur oleh meter, kesalahan pengawatan (wiring), dan faktor lainnya.[18]

2.1.9 Sistem Tenaga listrik

Energi listrik memiliki peranan yang sangat penting dan dibutuhkan dalam kehidupan manusia karena fungsinya yang vital dan strategis bagi aktivitas masyarakat, serta sebagai kebutuhan pokok sehari-hari dalam menunjang pembangunan nasional di berbagai bidang. Namun, masih banyak masyarakat yang belum memahami persyaratan sistem pemasangan instalasi listrik, daya tahan penggunaan peralatan dan perlengkapannya, serta kondisi instalasi listrik lama yang terpasang pada rumah maupun gedung, yang seharusnya memenuhi ketentuan dan peraturan yang berlaku. Instalasi listrik yang telah lama digunakan perlu dilakukan pemeriksaan ulang terhadap kelayakannya. Apabila hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa instalasi tersebut sudah

tidak memenuhi persyaratan, maka harus dilakukan penggantian. Pemeriksaan kelayakan ini wajib dilakukan oleh instansi yang berwenang minimal setiap 10 tahun sekali guna mencegah terjadinya kecelakaan dan kebakaran akibat instalasi listrik.[19]

2.1.10 Tahanan Kontak

Energi listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sangat dibutuhkan dan digunakan secara luas oleh masyarakat. Seiring dengan perkembangan teknologi dan modernisasi yang semakin pesat, tingkat konsumsi energi listrik terus meningkat, sehingga menjadikan energi listrik sebagai kebutuhan utama dalam kehidupan sehari-hari. Energi listrik dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik, kemudian disalurkan melalui sistem transmisi menuju jaringan distribusi. Pada jaringan distribusi, tegangan listrik diturunkan ke tingkat yang lebih rendah agar dapat dimanfaatkan secara langsung oleh konsumen.

Dalam sistem penyaluran tenaga listrik, gardu induk memiliki peranan penting karena dilengkapi dengan berbagai peralatan yang berfungsi menunjang proses distribusi energi listrik. Peralatan-peralatan tersebut terdiri dari beberapa jenis dengan karakteristik yang berbeda-beda. Untuk menjaga keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik, diperlukan pemeriksaan dan pemeliharaan secara rutin terhadap peralatan di gardu induk, mengingat beberapa peralatan rentan mengalami kerusakan. Kondisi inilah yang menjadi latar belakang perlunya kegiatan pemeliharaan pada perlengkapan gardu induk.

Rugi daya dalam sistem tenaga listrik dapat terjadi akibat besarnya nilai tahanan kontak pada titik-titik sambungan konduktor. Dalam suatu rangkaian listrik, selalu terdapat titik sambungan yang merupakan pertemuan minimal dua permukaan konduktor. Sambungan tersebut menimbulkan tahanan kontak yang dapat menyebabkan peningkatan suhu akibat timbulnya energi panas. Energi panas yang dihasilkan ini merupakan bentuk kerugian teknis yang berdampak pada penurunan efisiensi sistem tenaga listrik..[20]

2.1.11 Jaringan Distribusi Radial

Dalam proses penyaluran tenaga listrik, diperlukan suatu sistem yang berfungsi sebagai penghubung antara sistem transmisi bertegangan tinggi dengan pengguna energi listrik, yang dikenal sebagai sistem distribusi. Sistem distribusi ini umumnya

menggunakan konfigurasi jaringan radial. Setiap saluran pada jaringan distribusi memiliki nilai impedansi tertentu yang dapat menyebabkan terjadinya rugi-rugi daya dan penurunan tegangan. Kondisi tersebut perlu diminimalkan agar energi listrik yang disalurkan mendekati sama dengan energi yang diterima oleh konsumen. Salah satu upaya yang efektif dan efisien untuk mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan distribusi adalah melalui rekonfigurasi jaringan. Berbagai metode telah dikembangkan untuk tujuan tersebut, namun beberapa di antaranya, seperti metode Newton–Raphson dan fast decoupled, dinilai kurang sesuai untuk analisis aliran daya pada sistem distribusi, khususnya pada jaringan radial yang kompleks. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang mampu melakukan rekonfigurasi jaringan secara sederhana sekaligus optimal dalam menurunkan rugi-rugi energi listrik.

Pada sistem distribusi, sering dijumpai kondisi ketidakseimbangan beban antar fasa, mengingat sistem distribusi merupakan sistem tiga fasa, serta adanya kelebihan beban akibat peningkatan penggunaan peralatan elektronik oleh konsumen. Apabila kondisi tersebut dibiarkan secara terus-menerus, maka dapat menyebabkan penurunan keandalan sistem tenaga listrik, menurunnya kualitas energi listrik yang disalurkan, serta berpotensi menimbulkan kerusakan pada peralatan listrik terkait. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi ketidakseimbangan beban (unbalanced loading) antar fasa dan mengatasi kelebihan beban (overloading) pada jaringan distribusi. Selain itu, karakteristik jaringan distribusi radial yang cenderung memiliki rugi-rugi daya yang cukup besar juga dapat menyebabkan menurunnya tingkat keandalan sistem tenaga listrik.[21]

2.1.12 Salura Listrik Tegangan Menengah 20 kv

Dalam proses penyaluran energi listrik kepada pelanggan, diperlukan suatu sistem tenaga listrik yang andal dan berkinerja baik. Penyaluran energi listrik ini dilakukan melalui jaringan distribusi menuju berbagai jenis beban yang memerlukan suplai listrik, seperti beban rumah tangga, sektor industri, dan beban lainnya. Energi listrik disalurkan kepada konsumen melalui suatu sistem jaringan yang terdiri dari unit pembangkit dan unit penyaluran, yang dilengkapi dengan peralatan tenaga listrik pada gardu-gardu, baik

gardu induk maupun gardu distribusi, yang dioperasikan secara otomatis maupun manual. Kegiatan penyaluran tersebut meliputi pengaturan, pemindahan, serta distribusi tenaga listrik dari pusat pembangkit ke konsumen secara efektif, dengan tetap menjamin kontinuitas penyaluran dan kualitas pelayanan. Penyaluran energi listrik dapat dilakukan melalui dua metode, yaitu saluran udara (overhead line) dan saluran bawah tanah (underground line). Sistem kabel bawah tanah memiliki keunggulan dalam hal pengaturan tegangan yang lebih efisien dibandingkan dengan saluran udara. Meskipun sistem tenaga listrik telah dirancang seoptimal mungkin, gangguan tetap tidak dapat dihindari. Gangguan tersebut umumnya disebabkan oleh kegagalan isolasi pada sistem tenaga listrik maupun kerusakan yang terjadi pada kabel jaringan tegangan menengah (JTM).

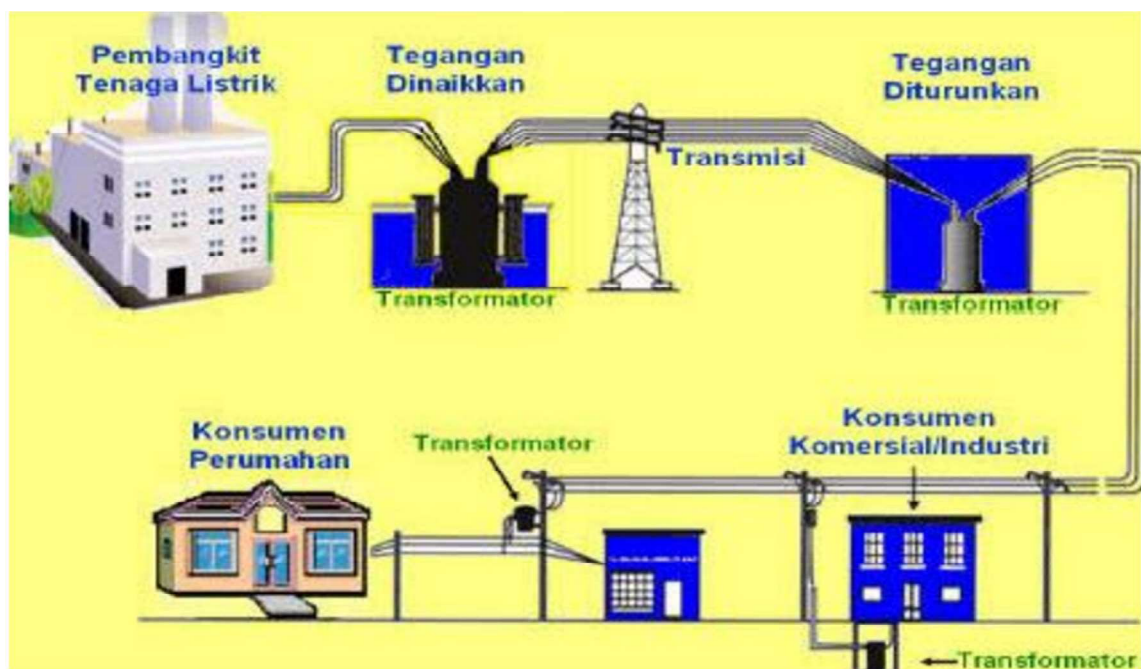
Sistem distribusi merupakan subsistem tersendiri dalam sistem tenaga listrik yang terdiri atas pusat pengendali distribusi (Distribution Control Center/DCC), saluran tegangan menengah (6 kV dan 20 kV) sebagai tegangan distribusi primer, yang dapat berupa saluran udara maupun kabel bawah tanah. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan gardu distribusi tegangan menengah yang berfungsi menurunkan tegangan menjadi tegangan rendah melalui panel-panel distribusi, yaitu 380 V dan 220 V, sehingga diperoleh tegangan kerja atau tegangan jala-jala yang digunakan oleh industri dan konsumen umum.

Energi listrik yang dihasilkan oleh pusat pembangkit selanjutnya disalurkan melalui jaringan transmisi sebelum akhirnya didistribusikan kepada konsumen melalui jaringan distribusi tenaga listrik. Pada umumnya, pembangkit tenaga listrik menghasilkan energi listrik pada tingkat tegangan menengah, yaitu sekitar 6–20 kV. Dalam sistem tenaga listrik berskala besar atau apabila lokasi pembangkit berada jauh dari pusat beban, tegangan tersebut dinaikkan dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi bahkan tegangan ekstra tinggi guna mengurangi rugi-rugi daya selama proses transmisi.

Sebagai contoh, tegangan keluaran generator sebesar 16 kV dinaikkan melalui transformator step-up menjadi sekitar 500 kV, kemudian disalurkan melalui saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Sebelum energi listrik disalurkan kepada konsumen pemakai tegangan tinggi, tegangan tersebut terlebih dahulu diturunkan dari tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan tinggi, yaitu sekitar 150 kV, dengan menggunakan

transformator step-down yang terdapat di gardu induk (GI). Selanjutnya, energi listrik dialirkan melalui saluran udara tegangan tinggi (SUTT) dan kembali diturunkan oleh gardu induk dari tegangan tinggi menjadi tegangan menengah, yaitu sekitar 20 kV.

Menjelang pusat-pusat pemakaian tenaga listrik, energi listrik yang disalurkan melalui jaringan tegangan menengah (JTM) kembali diturunkan menjadi tegangan rendah oleh transformator step-down yang berada di gardu distribusi. Tegangan keluaran yang dihasilkan adalah 220 V dan 380 V, yang kemudian didistribusikan kepada konsumen melalui jaringan tegangan rendah (JTR).[22]



Gambar 2. 16 Penyaluran Sistem Tenaga Listrik

2.2 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan studi literatur dengan menelaah berbagai penelitian dan sumber yang relevan sebagai dasar teori maupun acuan metodologi. Referensi yang digunakan dapat berupa jurnal ilmiah, artikel, skripsi, tesis, maupun buku yang berkaitan dengan topik penelitian.

Beberapa literatur yang dijadikan acuan dalam penelitian ini antara lain:

1. Menurut Uliasandi, Ari (2019), dalam jurnal yang berjudul “Analisa kWh Terselamatkan pada Pemeliharaan ABSW (Air Break Switch) dengan Metode PDKB (Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan) di PT PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan D.I. Yogyakarta. menyatakan Penelitian ini membahas tentang perhitungan energi listrik (kWh) yang berhasil diselamatkan melalui pelaksanaan pekerjaan PDKB pada pemeliharaan Air Break Switch. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode PDKB mampu mengurangi jumlah energi yang tidak tersalurkan (ENS) serta meningkatkan kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Penelitian ini menjadi acuan dalam metode perhitungan energi terselamatkan (kWh) pada pekerjaan pemeliharaan jaringan, termasuk dalam perbaikan isolator tarik yang dilakukan menggunakan metode PDKB.[23]
2. Menurut Maulana, R. (2019) dalam jurnal yang berjudul “Evaluasi Efektivitas Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) terhadap Keandalan Sistem Distribusi di UP3 Bandung.”. Menyatakan bahwa Studi ini menunjukkan bahwa penerapan PDKB pada pekerjaan pemeliharaan jaringan distribusi secara signifikan menurunkan nilai SAIDI dan SAIFI (indeks keandalan sistem). Dengan demikian, PDKB terbukti efektif dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik tanpa pemadaman. Penelitian ini mendukung analisis tentang bagaimana metode PDKB dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi pada jaringan 20 kV.[23]
3. Menurut Suryani, D. (2021), dalam jurnal yang berjudul “Analisa Gangguan pada Jaringan SUTM 20 kV dan Dampaknya terhadap Keandalan Sistem Distribusi di PLN UP3 Surabaya.” menyatakan bahwa Penelitian ini mengidentifikasi jenis gangguan dominan seperti isolator pecah, sambungan longgar, dan konduktor putus. Upaya pemeliharaan rutin mampu menekan angka gangguan hingga 20%. Penelitian ini mendukung analisis penyebab kerusakan isolator tarik dan pentingnya tindakan pemeliharaan dengan metode PDKB.[24]
4. Menurut Hidayat, F. (2022) , dalam jurnal yang berjudul “Analisis Penerapan Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) terhadap Penurunan Energi Tidak Tersalurkan (ENS) di PT PLN (Persero) UP3 Medan.” Penerapan PDKB terbukti mengurangi ENS hingga 35% dibandingkan metode konvensional yang

membutuhkan pemadaman. Penelitian ini relevan karena membahas dampak langsung PDKB terhadap efisiensi penyaluran energi dan peningkatan kinerja jaringan distribusi.[25]