

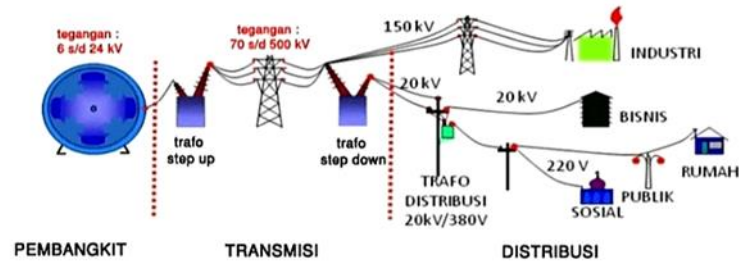
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik adalah salah satu bentuk energi utama yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Energi ini digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, industri, dan bisnis. Saat ini, listrik dapat dihasilkan dengan mudah, didistribusikan ke berbagai tempat, dan diubah menjadi bentuk energi lain. Instalasi listrik di bangunan, sistem distribusi tenaga listrik, mesin, dan perangkat listrik digunakan untuk membuat, mengubah, membagikan, dan memanfaatkan energi listrik dalam skala yang luas. Dalam sistem tenaga listrik, saluran transmisi bertugas mengirim energi listrik dengan tegangan tinggi ke pusat beban yang menggunakan tegangan tinggi atau sedang, memungkinkan transfer daya dalam jarak jauh dengan risiko kehilangan energi yang kecil. Sebaliknya, saluran distribusi berfungsi untuk mengirim daya listrik ke beban akhir melalui saluran dengan tegangan rendah, yang memfasilitasi akses energi yang langsung dan sesuai dengan kebutuhan konsumen.

Secara umum, sistem tenaga listrik dimulai dari unit pembangkit energi listrik, di mana energi tersebut kemudian dialirkan melalui jaringan transmisi bertegangan tinggi, dan selanjutnya didistribusikan kepada konsumen akhir melalui sistem distribusi. Sistem distribusi ini memiliki keterkaitan langsung dengan pengguna akhir, sehingga pada tahap ini terdapat berbagai kendala sistematis yang wajib diperhatikan oleh penyedia layanan energi listrik.



Gambar 2.1 Alur Sistem Tenaga Listrik

Energi yang disalurkan harus memenuhi persyaratan yang ditetapkan, termasuk penyediaan kuantitas dan kualitas daya yang optimal, kontinuitas pelayanan yang andal, serta parameter teknis seperti tegangan, faktor daya, dan frekuensi sistem yang memadai. Dalam konteks ini, pemahaman terhadap dinamika sistem distribusi menjadi krusial untuk memastikan efisiensi operasional dan kepuasan konsumen, sekaligus mengatasi tantangan seperti fluktuasi beban atau gangguan teknis yang dapat memengaruhi stabilitas jaringan. Penyedia energi listrik harus mengintegrasikan praktik-praktik rekayasa yang canggih untuk menjaga standar kualitas ini, sehingga mendukung keberlanjutan dan keandalan pasokan listrik di tingkat masyarakat. Dengan demikian, analisis mendalam terhadap komponen-komponen ini tidak hanya memperkuat fondasi teoretis sistem tenaga listrik tetapi juga memberikan wawasan praktis untuk pengembangan infrastruktur energi masa depan (Muhtar dkk., 2022).

Sistem distribusi tenaga listrik dapat dipahami sebagai mekanisme penyaluran energi listrik yang dimulai dari gardu induk menuju ke konsumen akhir, memainkan peran krusial dalam ekosistem kelistrikan modern. Secara konseptual, sistem ini diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder, yang masing-masing memiliki karakteristik operasional dan teknis

yang berbeda untuk mengoptimalkan efisiensi pengiriman daya. Distribusi primer melibatkan proses penyaluran yang berawal dari gardu induk khususnya dari sisi sekunder transformator daya menuju ke gardu distribusi pada sisi primer transformator distribusi, atau secara langsung ke konsumen yang beroperasi pada tegangan menengah sebesar 20 kV. Dalam konteks ini, tegangan tinggi awalnya ditransformasi menjadi tegangan menengah melalui transformator step-down, yang memungkinkan transfer energi dalam skala regional dengan risiko kehilangan daya yang minimal. Di sisi lain, distribusi sekunder mencakup penyaluran dari gardu distribusi pada sisi sekunder transformator distribusi menuju ke konsumen tegangan rendah, memfasilitasi akses energi pada tingkat lokal yang lebih terjangkau.

Energi tenaga listrik dalam sistem ini dialirkan melalui penyulang-penyulang, yang dapat berupa saluran udara terbuka atau saluran kabel bawah tanah, dengan penyulang distribusi utama terlokasi di gardu distribusi. Fungsi gardu distribusi yang esensial adalah menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah atau tegangan distribusi sekunder, biasanya sebesar 220/380 V, sehingga memungkinkan integrasi yang aman dengan beban konsumen. Konsumen tenaga listrik kemudian disambungkan dari Jaringan Tegangan Rendah (JTR) melalui Saluran Rumah (SR), di mana energi listrik pertama-tama masuk ke Alat Pembatas dan Pengukur (APP) sebelum mencapai instalasi rumah konsumen. APP berperan penting dalam membatasi kapasitas daya yang dapat digunakan serta mengukur konsumsi energi listrik oleh pelanggan, yang tidak hanya mendukung pengelolaan sumber daya yang efisien tetapi juga memfasilitasi penagihan yang akurat dan adil. Dalam perspektif akademik yang lebih luas, jaringan distribusi tenaga listrik merupakan komponen integral dari sistem

tenaga listrik secara keseluruhan, yang secara langsung berinteraksi dengan pelanggan dan memengaruhi kualitas layanan harian. Sistem ini terdiri dari subsistem distribusi tegangan menengah dan subsistem distribusi tegangan rendah, yang bersama-sama membentuk jembatan antara infrastruktur hulu seperti pusat pembangkit tenaga listrik, jaringan transmisi, dan gardu induk dengan kebutuhan konsumen akhir. Pendekatan ini menekankan pentingnya rekayasa sistematis untuk mengatasi tantangan seperti fluktuasi beban, kehilangan daya selama transmisi, dan kebutuhan akan kontinuitas pasokan, yang sering kali dianalisis melalui model matematis seperti analisis aliran daya atau simulasi jaringan. Dengan demikian, pemahaman mendalam terhadap dinamika distribusi primer dan sekunder tidak hanya memperkaya literatur teknik kelistrikan tetapi juga memberikan landasan untuk inovasi dalam pengembangan jaringan pintar (smart grid), yang dapat meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal dan mendukung transisi menuju energi berkelanjutan. Struktur ini, secara keseluruhan, mencerminkan interdependensi antara elemen teknis dan sosial dalam penyediaan energi, di mana efisiensi distribusi berkontribusi pada pembangunan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat (Hidayat2, 2023).

Secara lebih mendalam, fungsi utama saluran distribusi adalah mengalirkan energi listrik dari gardu distribusi ke beban akhir dengan mengurangi tegangan menjadi level rendah, sehingga energi tersebut siap digunakan oleh peralatan listrik di sisi konsumen. Dalam penerapan di lapangan, sistem distribusi tegangan rendah ini dibagikan dalam tiga fase menuju konsumen, yang tidak hanya memastikan keseimbangan beban tetapi juga meningkatkan stabilitas jaringan. Pendekatan ini mencerminkan prinsip-prinsip rekayasa kelistrikan yang bertujuan untuk

mengoptimalkan efisiensi dan keandalan, di mana perbedaan antara transmisi dan distribusi menjadi kunci dalam mengatasi tantangan seperti fluktuasi permintaan energi atau gangguan teknis. Dalam kajian akademik, pemahaman terhadap dinamika ini tidak hanya memperkaya bidang teknik elektro tetapi juga memberikan wawasan tentang implikasi sosial-ekonomi, seperti kontribusi terhadap pembangunan dan penggunaan energi alternatif. Dengan demikian, analisis sistem distribusi tegangan rendah menjadi dasar untuk inovasi dalam pengembangan jaringan, yang dapat membantu memantau dan mengelola konsumsi energi, sehingga mendukung keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat. Struktur ini, secara keseluruhan, menekankan hubungan antara produksi, transmisi, dan distribusi energi listrik sebagai bagian penting dalam sistem energy (Permana & Stefanie, 2023).

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.2.1 Pengertian Sistem Distribusi

Menurut buku Teknik Distribusi Tenaga Listrik jilid 1 yang ditulis oleh Suhadi, dkk (2006 : 11) menyebutkan bahwa sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi tenaga listrik berperan penting dalam mengalirkan energi listrik dari sumber daya listrik besar, yang dikenal sebagai sumber daya utama (bulk power source), hingga ke konsumen akhir. Oleh karena itu, fungsi utama distribusi tenaga listrik adalah sebagai mekanisme pembagian atau penyaluran energi listrik ke berbagai lokasi atau pelanggan, memastikan akses yang merata dan efisien.

Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik skala besar, dengan tegangan awal antara 11 kV hingga 24 kV, dinaikkan teganganannya melalui gardu induk menggunakan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220

kV, atau bahkan 500 kV. Energi tersebut kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan utama dari peningkatan tegangan ini adalah untuk mengurangi kerugian daya listrik selama proses transmisi, karena tegangan yang lebih tinggi memungkinkan transfer energi dengan resistansi yang lebih rendah.

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan kembali menjadi 20 kV menggunakan transformator penurun tegangan di gardu induk distribusi. Dengan tegangan ini, penyaluran energi listrik dilanjutkan melalui saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer tersebut, gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan lebih lanjut dengan transformator distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 V. Selanjutnya, energi disalurkan melalui saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan demikian, jelas bahwa sistem distribusi merupakan komponen krusial dalam keseluruhan sistem tenaga listrik, yang menghubungkan produksi energi dengan penggunaan akhir (Syafira dkk., 2016).

2.2.2 Klasifikasi Berdasarkan Tegangan

Berdasarkan nilai tegangan, sistem distribusi tenaga listrik dibedakan menjadi dua macam, yaitu:

a. Sistem Distribusi Tegangan Menengah/Primer

Tegangan distribusi primer yang digunakan oleh PLN meliputi 20 kV, 12 kV, dan 6 kV. Tegangan 20 kV merupakan pilihan utama yang sedang dikembangkan oleh PLN untuk mendukung efisiensi sistem distribusi. Dalam konteks rekayasa kelistrikan, 20 kV memungkinkan transfer daya yang lebih optimal dan mengurangi kehilangan energi. Pendekatan ini meningkatkan keandalan pasokan listrik di Indonesia.

b. Sistem Distribusi Tegangan Rendah/Sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder, yang sering dikenal sebagai Jaringan Tegangan Rendah (JTR), dapat didefinisikan sebagai jaringan yang berperan penting dalam mengalirkan energi listrik dari gardu distribusi ke pusat-pusat beban, yaitu konsumen tenaga listrik. Standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini mencakup 127/220 V untuk sistem lama, 220/380 V untuk sistem baru, dan 440/550 V untuk kebutuhan industri. Tegangan maksimum yang diperbolehkan adalah 3 hingga 4% lebih tinggi dari tegangan nominalnya, yang sejalan dengan nilai tegangan jatuh (voltage drop) yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Pemerintah tentang Instalasi Listrik (PUIL), di mana rugi-rugi daya pada jaringan dibatasi hingga 15%.

Dalam konteks rekayasa kelistrikan, JTR memastikan distribusi energi yang efisien dan aman ke konsumen akhir, seperti rumah tangga atau pabrik. Pendekatan ini tidak hanya mengoptimalkan penggunaan energi tetapi juga mendukung keberlanjutan sistem tenaga listrik secara keseluruhan, dengan meminimalkan kehilangan daya dan mematuhi standar regulasi (Duyo, 2020).

2.2.3 Peran Gardu Dalam Menyalurkan Listrik Ke Pelanggan

Gardu distribusi dapat diidentifikasi sebagai salah satu elemen kunci dalam sistem distribusi tenaga listrik yang dikelola oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN), yang berperan penting dalam menghubungkan jaringan listrik utama dengan konsumen akhir. Komponen ini secara spesifik dirancang untuk mendistribusikan energi listrik kepada pelanggan, baik yang menggunakan tegangan menengah maupun tegangan rendah, memastikan aliran daya yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan

masing-masing kategori pengguna. Dalam konteks ini, gardu distribusi berfungsi sebagai titik transisi antara saluran distribusi primer dan sekunder, di mana tegangan listrik diturunkan dari level menengah menjadi rendah untuk memfasilitasi penggunaan yang aman dan efisien oleh konsumen rumah tangga, industri kecil, atau bisnis komersial.

Secara lebih mendalam, peran gardu distribusi meliputi beberapa aspek teknis dan operasional yang mendukung keseluruhan ekosistem penyediaan listrik. Pertama, gardu ini bertugas sebagai pusat pengaturan tegangan, di mana transformator distribusi digunakan untuk mengkonversi tegangan dari saluran primer (biasanya 20 kV) menjadi tegangan rendah seperti 220/380 V, yang sesuai untuk peralatan rumah tangga atau komersial. Kedua, gardu distribusi memungkinkan pembagian daya ke berbagai pelanggan melalui saluran sekunder, yang mencakup jaringan kabel udara atau bawah tanah, sehingga meminimalkan risiko gangguan dan memastikan kontinuitas pasokan. Ketiga, dalam skala yang lebih luas, gardu ini berkontribusi pada efisiensi sistem distribusi secara keseluruhan, karena membantu mengatasi tantangan seperti fluktuasi beban atau kehilangan daya selama transmisi, yang sering kali dianalisis melalui model rekayasa kelistrikan.

Gardu distribusi berperan krusial dalam memastikan akses listrik yang merata di wilayah perkotaan dan pedesaan, yang secara langsung berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. Integrasi teknologi canggih, seperti sistem pemantauan otomatis, memungkinkan gardu distribusi berkembang menjadi komponen jaringan pintar, yang memfasilitasi pengelolaan energi yang lebih adaptif terhadap fluktuasi permintaan konsumen. Dengan demikian,

gardu distribusi bukan hanya elemen infrastruktur fisik, melainkan entitas strategis yang menghubungkan sumber energi skala besar dengan kebutuhan harian pelanggan, menjamin keandalan dan keberlanjutan pasokan listrik di Indonesia. Pendekatan ini menekankan pentingnya rekayasa kelistrikan dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan transisi menuju energi yang lebih efisien (Fath Ashari, 2021).

2.3 Komponen Utama Jaringan Distribusi

2.3.1 Saluran udara tegangan menengah (SUTM)/Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan Tegangan Menengah (JTM), yang sering disebut sebagai jaringan distribusi primer, adalah bagian penting dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi. JTM berfungsi sebagai saluran utama untuk mengalirkan energi listrik dengan tegangan menengah, biasanya antara 11 kV hingga 33 kV, yang memungkinkan transfer daya dalam skala regional dengan efisien. Komponen ini membantu mengalirkan energi dari sumber utama ke titik distribusi berikutnya dan menjaga stabilitas jaringan dengan mengurangi risiko kehilangan daya.

Secara lebih detail, JTM dirancang untuk menangani beban listrik yang lebih besar, cocok untuk konsumen seperti industri atau bisnis menengah. Dalam kajian teknik elektro, JTM dianalisis sebagai jembatan antara transmisi tegangan tinggi dan distribusi rendah, memastikan energi dibagikan merata dan aman. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi dan mendukung energi ramah lingkungan.

Secara teknis, kawat hantar pada SUTM diposisikan di atas permukaan tanah melalui tiang-tiang penyangga, yang tidak hanya mengurangi risiko kontak langsung dengan manusia atau hewan tetapi juga memungkinkan aliran udara yang membantu

pendinginan kawat, sehingga mengurangi resistansi dan kehilangan daya (Asyadi, 2023).

2.3.2 Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) adalah jenis saluran distribusi yang mengalirkan energi listrik melalui kabel yang dipasang di dalam tanah. Kategori saluran distribusi ini sangat disukai untuk pemasangan di daerah perkotaan karena memberikan keunggulan estetika dan keamanan. Karena kabelnya berada di bawah tanah, SKTM tidak mengganggu pemandangan kota dan lebih tahan terhadap gangguan yang disebabkan oleh kondisi cuaca buruk atau faktor alam lainnya, seperti angin kencang atau pohon tumbang. Namun, SKTM juga memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya investasi yang tinggi dan kesulitan dalam mengidentifikasi serta memperbaiki titik gangguan. Dalam konteks rekayasa kelistrikan, pemilihan SKTM sering dipertimbangkan berdasarkan analisis biaya-manfaat, di mana keunggulannya dalam keandalan jangka panjang dapat mengimbangi tantangan awal. Pendekatan ini mendukung pengembangan infrastruktur energi yang lebih berkelanjutan, terutama di kota-kota padat penduduk. Keunggulan SKTM meliputi tidak mengganggu estetika kota, lebih aman dari gangguan cuaca, dan cocok untuk area urban, sementara kelemahannya adalah biaya investasi mahal dan sulit mendeteksi serta memperbaiki kerusakan. Secara akademik, SKTM dipilih untuk efisiensi jangka panjang, mendukung keberlanjutan energi di lingkungan perkotaan (Rizky dkk., 2022).

2.3.3 Gardu Distribusi

Bangunan gardu listrik merupakan struktur penting yang berisi berbagai instalasi untuk mendistribusikan energi listrik kepada konsumen. Secara spesifik, bangunan ini terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD), dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR). Komponen-komponen ini bekerja sama untuk memasok kebutuhan tenaga listrik kepada pelanggan, baik yang menggunakan Tegangan Menengah (TM) sebesar 20 kV maupun Tegangan Rendah (TR) sebesar 220/380 V. Dalam konteks ini, PHB-TM berfungsi sebagai penghubung untuk tegangan menengah, memungkinkan aliran daya dari saluran utama ke transformator. Transformator Distribusi (TD) kemudian menurunkan tegangan dari level menengah menjadi rendah, sementara PHB-TR mengatur distribusi akhir ke konsumen.

Secara lebih mendalam, bangunan gardu listrik ini dirancang untuk memastikan keamanan dan efisiensi dalam penyediaan listrik. PHB-TM, sebagai komponen awal, memungkinkan pengaturan dan pembagian daya pada tegangan 20 kV, yang cocok untuk pelanggan industri atau komersial skala menengah. Transformator Distribusi (TD) memainkan peran krusial dalam konversi tegangan, mengubah 20 kV menjadi 220/380 V, sehingga energi listrik dapat digunakan oleh peralatan rumah tangga atau bisnis kecil. Akhirnya, PHB-TR mengelola distribusi pada tegangan rendah, memastikan pasokan yang stabil dan sesuai standar. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keandalan jaringan tetapi juga mendukung pengembangan infrastruktur energi yang berkelanjutan, terutama di daerah perkotaan atau pedesaan (Hanma, 2021).



Gambar 2.2 Bagian Dalam Gardu Distribusi

Sumber: Dokumentasi Gardu Distribusi PLN ULP Makale

2.4 Jenis Gardu Distribusi

2.4.1 Gardu Beton

Komponen-komponen utama instalasi, termasuk transformator serta peralatan switching dan proteksi, diintegrasikan dalam struktur bangunan sipil yang dirancang, dikonstruksi, dan dioperasikan menggunakan sistem pasangan batu dan beton. Desain konstruksi ini dirancang untuk memastikan pemenuhan standar optimal terkait keselamatan dalam bidang ketenagalistrikan.



Gambar 2.3 Konstruksi Gardu Beton

Sumber: https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRe6jncCbEBS9Fdf2EyFWEOMSIY4AyeC9ryMv1JCoueUh_ukWVpXD-W5uVwolkqe1JjoII&usqp=CAU

2.4.2 Gardu Cantol

Gardu Cantol menggunakan transformator yang dipasang pada gardu listrik tipe terbuka (outdoor) dengan konstruksi satu tiang atau lebih. Jenis CSP (Completely Self Protected Transformer) adalah transformator di mana peralatan switching dan sistem proteksinya telah terintegrasi secara lengkap di dalam tangki transformator.



Gambar 2.4 Konstruksi Gardu Cantol

Sumber: <https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSKmwKUcTivfbkgxtb3PcfJuLDJcXVF6crPZ8qE5yFHUZyxGjKaXL9JEVdX3eTcjWLgy48&usqp=CAU>

2.4.3 Gardu Portal

Gardu portal adalah gardu listrik tipe terbuka (out-door) dengan memakai konstruksi dua tiang atau lebih. Tempat kedudukan transformator sekurang-

kurangnya 3 meter di atas tanah dan ditambahkan platform sebagai fasilitas kemudahan kerja teknisi operasi dan pemeliharaan.



Gambar 2.5 Konstruksi Gardu Portal

Sumber: https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRq8c9mpVNRAIzcXTTN_GjtYsOIpiBJVjIYTcj2Nbr3yJaZrcvqTKW1LopgEOYZ23Lyw&usqp=CAU

2.5 Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan listrik tegangan rendah merupakan bagian penting dari sistem distribusi energi listrik yang dirancang untuk memasok daya ke berbagai peralatan sehari-hari. Secara umum, tegangan rendah ini didefinisikan sebagai rentang antara 50 volt hingga 1000 volt, yang membuatnya aman dan efisien untuk penggunaan domestik serta komersial. Listrik dengan tegangan rendah ini sangat umum digunakan pada peralatan rumah tangga seperti lampu, televisi, kulkas, dan mesin cuci, serta dalam lingkungan industri untuk mesin-mesin ringan atau alat-alat produksi yang tidak memerlukan daya tinggi. Hal ini berbeda dengan jaringan tegangan tinggi, yang digunakan untuk transmisi jarak jauh guna meminimalkan kehilangan energi.

Secara spesifik, jaringan tegangan rendah dengan tegangan kerja 220/380 volt dikenal sebagai jaringan distribusi sekunder. Tegangan 220 volt biasanya digunakan untuk beban satu fasa, seperti di rumah tangga, sedangkan 380 volt untuk beban tiga fasa, yang lebih cocok untuk industri atau bangunan besar. Sumber energi untuk jaringan ini berasal dari gardu distribusi, yang merupakan titik transformasi dari tegangan menengah (seperti 11 kV atau 20 kV) menjadi tegangan rendah yang siap didistribusikan melalui kabel-kabel ke konsumen akhir. Gardu distribusi ini sering ditempatkan di dekat area pemukiman atau pabrik untuk memastikan efisiensi dan keamanan. Sistem penyaluran daya listrik di jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR) dapat dibedakan menjadi dua jenis saluran utama, yaitu Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) dan Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR).

2.5.1 Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)

Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) merupakan saluran distribusi listrik yang menggunakan penghantar berupa kabel telanjang tanpa isolasi, seperti kabel AAAC (All Aluminum Alloy Conductor) dan kabel ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced), yang dirancang khusus untuk penyaluran energi listrik melalui udara dengan menggunakan tiang sebagai penyangga. Penggunaan kabel jenis ini dipilih karena memiliki kekuatan mekanis yang baik, konduktivitas listrik yang tinggi, serta lebih ekonomis untuk penyaluran daya pada jaringan distribusi tegangan rendah.

2.5.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR)

Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) merupakan jenis saluran distribusi yang menggunakan penghantar berupa kabel berisolasi untuk meningkatkan

keselamatan, keandalan, serta kualitas penyaluran energi listrik. Salah satu jenis kabel yang umum digunakan pada SKUTR adalah kabel LVTC (Low Voltage Twisted Cable) dengan berbagai ukuran penampang, seperti $2 \times 10 \text{ mm}^2$, $2 \times 16 \text{ mm}^2$, $4 \times 25 \text{ mm}^2$, $3 \times 35 \text{ mm}^2$, $3 \times 50 \text{ mm}^2$, dan $3 \times 70 \text{ mm}^2$. Variasi ukuran penampang tersebut disesuaikan dengan kapasitas arus dan panjang saluran agar penyaluran daya listrik tetap aman, efisien, serta memenuhi standar teknis jaringan distribusi tegangan rendah.

Berdasarkan peraturan SPLN No.74 tahun 1987, penyambungan jaringan tegangan rendah didefinisikan sebagai sambungan rumah (SR), yang mencakup penghantar di bawah tanah atau di atas tanah beserta peralatannya, mulai dari titik penyambungan pada tiang JTR hingga mencapai alat pembatas dan pengukur (APP), untuk memastikan koneksi yang aman dan terukur (Supendi dkk., 2023).

2.6 Susut Energi Listrik

Susut atau kerugian energi listrik dapat diartikan sebagai selisih antara energi listrik yang disalurkan oleh penyedia tenaga listrik dengan energi listrik yang tercatat dan terjual kepada pelanggan. Selisih tersebut menunjukkan adanya energi yang tidak sampai atau tidak terukur pada sisi pelanggan. Selain itu, berdasarkan ketentuan Menteri Keuangan Nomor 431/KMK.06/2002, susut energi listrik didefinisikan sebagai energi listrik yang hilang selama proses penyaluran energi, mulai dari gardu induk hingga ke konsumen, atau dari gardu distribusi hingga ke konsumen apabila sistem tidak dilengkapi dengan gardu induk (Syukri dkk., 2024). Berdasarkan sumber dan penyebab terjadinya kehilangan energi tersebut, susut energi listrik pada sistem distribusi secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu susut teknis dan susut non-teknis.

2.6.1 Susut Teknis

Susut teknis merupakan kehilangan energi listrik yang terjadi akibat adanya impedansi pada peralatan pembangkitan serta pada sistem penyaluran tenaga listrik, baik pada jaringan transmisi maupun distribusi. Impedansi tersebut menyebabkan sebagian energi listrik yang mengalir melalui penghantar dan peralatan listrik berubah menjadi energi panas selama proses penyaluran. Besarnya susut teknis dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain karakteristik penghantar, panjang saluran, arus beban yang mengalir, serta kondisi peralatan distribusi. Semakin besar impedansi dan arus yang mengalir pada jaringan, maka semakin besar pula energi listrik yang hilang sebagai susut teknis.

2.6.2 Susut Non Teknis

Susut nonteknis merupakan kehilangan energi listrik yang disebabkan oleh faktor di luar kondisi teknis jaringan, seperti kesalahan pencatatan dan pembacaan alat ukur, ketidaktepatan kalibrasi meter energi, serta penggunaan energi listrik yang tidak sah. Susut nonteknis juga dapat terjadi akibat pencurian energi listrik oleh oknum-oknum yang tidak bertanggung jawab, sehingga energi yang disalurkan tidak seluruhnya tercatat atau tertagih secara administratif. Selain itu, susut nonteknis dapat dipengaruhi oleh kesalahan administratif dalam proses pendataan dan penagihan energi listrik. Perlu dipahami bahwa kehilangan daya listrik tidak dapat dihindari sepenuhnya karena setiap peralatan listrik memiliki efisiensi yang terbatas dan tidak mungkin mencapai 100 persen. Namun demikian, susut energi yang terjadi perlu dikendalikan agar tetap berada dalam batas kewajaran. Pada praktiknya, sebagian

besar susut energi umumnya terjadi pada jaringan distribusi tenaga listrik (Sugianto & Untara, 2019).

Berdasarkan kajian teoritis dan hasil penelitian terdahulu, susut teknis pada jaringan distribusi tenaga listrik merupakan kehilangan energi listrik yang terjadi secara alamiah akibat adanya hambatan listrik pada penghantar dan peralatan sistem distribusi. Salah satu komponen utama yang berkontribusi terhadap terjadinya susut teknis adalah hambatan penghantar, yang besarnya dipengaruhi oleh karakteristik material penghantar, panjang saluran, serta luas penampang penghantar yang digunakan. Hubungan antara parameter-parameter tersebut secara teoritis dinyatakan melalui persamaan hambatan penghantar yang dikembangkan dan digunakan dalam analisis jaringan distribusi tegangan rendah, sebagaimana dijelaskan oleh (Simatupang & Dewanto, 2024), yaitu:

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana

R: Tahanan/resistansi (Ω)

ρ :Tahanan jenis kabel ($\Omega \cdot \text{mm}^2$)

L : Panjang kabel (m)

A :Luas penampang kabel (m^2)

Persamaan ini menunjukkan bahwa hambatan berbanding lurus dengan panjang saluran, sehingga semakin panjang jaringan tegangan rendah, maka nilai hambatan penghantar akan semakin besar. Dalam praktik di lapangan, keberadaan susut teknis

pada jaringan tegangan rendah juga tercermin dari terjadinya penurunan tegangan (voltage drop) sepanjang saluran distribusi. Penurunan tegangan ini merupakan indikator langsung dari adanya hambatan penghantar dan rugi-rugi daya, yang secara umum dinyatakan dengan hubungan

$$V = I \times R \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana

V :Tegangan (V)

I :Arus (A)

R :Resistansi (Ω)

Hambatan penghantar Juga menimbulkan rugi-rugi daya ketika arus listrik mengalir melalui jaringan. Rugi-rugi daya ini merupakan bentuk utama dari susut teknis dan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{loss} = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana

P_{loss} : Rugi-rugi daya atau susut teknis (Watt)

I : Arus beban (A)

R : Hambatan penghantar (Ω)

Berdasarkan persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa besarnya susut teknis tidak hanya dipengaruhi oleh hambatan penghantar, tetapi juga oleh besarnya arus beban yang mengalir pada jaringan distribusi. Dalam praktik di lapangan, susut teknis pada

jaringan tegangan rendah juga dapat diidentifikasi melalui terjadinya penurunan tegangan (voltage drop) sepanjang saluran distribusi. Penurunan tegangan ini merupakan indikator langsung dari adanya rugi-rugi daya pada penghantar. Sesuai dengan standar perhitungan yang digunakan oleh PT PLN (Persero), besarnya penurunan tegangan pada jaringan distribusi tegangan rendah dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\Delta V = \frac{L \times P}{V \times A \times \lambda} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana

ΔV :Penurunan tegangan (V)

L :Panjang saluran (m)

P :Daya beban (VA)

V :Nominal tegangan (N)

A :A Luas penampang penghantar (mm²)

λ :Konduktivitas bahan penghantar.

2.6.3 Faktor-Faktor Yang Mendorong Terjadinya Susut Teknis

Susut teknis didefinisikan sebagai kehilangan energi listrik yang terjadi secara alamiah pada sistem distribusi akibat adanya rugi-rugi daya pada penghantar dan peralatan listrik. Apabila susut teknis terjadi dalam jumlah yang besar, maka efisiensi penyaluran energi listrik akan menurun dan berdampak pada kualitas tegangan yang diterima pelanggan. Peningkatan arus beban yang mengalir pada penghantar akan menyebabkan rugi-rugi daya semakin besar akibat efek pemanasan

pada penghantar, sehingga nilai susut teknis meningkat. Karakteristik penghantar, khususnya luas penampang dan jenis material kabel, sangat berpengaruh terhadap besarnya susut teknis pada jaringan distribusi. Selain itu, juga panjang saluran distribusi dan impedansi jaringan menjadi faktor dominan yang mendorong terjadinya susut teknis, karena semakin panjang penghantar maka nilai hambatan listrik semakin besar, sehingga rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi tenaga listrik turut meningkat. Dengan demikian, faktor-faktor seperti panjang saluran, besar arus beban, jenis dan luas penampang penghantar, serta kondisi jaringan merupakan parameter utama yang memengaruhi besarnya susut teknis pada jaringan distribusi tenaga listrik (Yuntyansyah dkk., 2015).

2.7 Metode Regresi Linear

Metode regresi linear merupakan salah satu teknik analisis statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan fungsional antara satu variabel bebas dan satu variabel terikat dalam bentuk hubungan linier. Regresi linear sederhana dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis $Y = a + bX$. Dimana a merupakan konstanta dan b adalah koefisien regresi yang menunjukkan besarnya perubahan variabel terikat akibat perubahan satu satuan variabel bebas. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian kuantitatif untuk mengetahui pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya secara numerik dan terukur (Zuhri, 2016).

Analisis regresi linear digunakan untuk mengukur dan memahami seberapa jauh variabel bebas memengaruhi variabel terikat, serta dapat dimanfaatkan untuk memprediksi besarnya variabel terikat berdasarkan nilai variabel bebas dalam penelitian kuantitatif. Studi-studi mengenai penerapan regresi linear sederhana menegaskan bahwa metode ini bermanfaat untuk menyatakan pola hubungan linier

antara dua variabel yang diteliti dan menginterpretasikan pengaruh perubahan satu variabel terhadap variabel lainnya dalam konteks penelitian. Adapun fungsi-fungsi yang digunakan dalam perhitungan regresi adalah sebagai berikut:

a. Fungsi SLOPE

Fungsi SLOPE digunakan untuk menghitung nilai koefisien regresi (kemiringan garis), yaitu besarnya perubahan variabel terikat (tegangan) terhadap perubahan variabel bebas (panjang jaringan). Secara matematis, slope menyatakan laju penurunan tegangan sepanjang jaringan

b. Fungsi INTERCEPT

Fungsi INTERCEPT digunakan untuk menentukan nilai konstanta (titik potong terhadap sumbu Y), yaitu nilai tegangan pada saat panjang jaringan sama dengan nol. Secara fisik, nilai ini merepresentasikan tegangan pada pangkal jaringan atau sumber.

c. Fungsi RSQ

Fungsi RSQ digunakan untuk menghitung nilai koefisien determinasi (R^2), yaitu ukuran statistik yang menunjukkan seberapa besar kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan variabel terikat (Adelia Syahfitri, 2025).

2.8 Penelitian Terkait Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Terdahulu

No	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Simatupang, H. & Dewanto, Y.	2024	Pengaruh Panjang Jaringan Tegangan Rendah terhadap Susut Teknis	Semakin panjang jaringan tegangan rendah, maka nilai susut teknis semakin meningkat akibat bertambahnya hambatan penghantar dan rugi-rugi daya.
2	Syukri, M., dkk.	2024	Analisis Susut Teknis pada Jaringan Distribusi Tegangan Rendah	Susut teknis dipengaruhi oleh arus beban, panjang saluran, dan luas penampang penghantar, di mana rugi-rugi daya meningkat seiring kenaikan arus dan panjang jaringan.
3	Utomo, A., dkk.	2019	Evaluasi Susut Teknis pada Jaringan Distribusi Tegangan Rendah	Konfigurasi jaringan dan kondisi sambungan yang kurang baik dapat meningkatkan susut teknis dan menurunkan efisiensi penyaluran energi listrik.
4	Syamsudin	2015	Analisis Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi Tegangan Rendah	Susut teknis terjadi secara alamiah akibat hambatan penghantar dan peralatan distribusi, serta dipengaruhi oleh panjang saluran dan besar arus beban.
6	Barazuki, A.	2018	Studi Susut Teknis pada Sistem Distribusi Tegangan Rendah	Penggunaan penghantar dengan penampang kecil dan jaringan yang panjang meningkatkan nilai susut teknis akibat rugi-rugi resistif pada saluran.

No	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
7	Untara, R.	2020	Analisis Faktor Penyebab Susut Teknis pada Jaringan Distribusi	Panjang jaringan, arus beban yang tinggi, serta kondisi penghantar merupakan faktor utama yang mendorong terjadinya susut teknis pada JTR..
8	Wahyudianto	2017	Analisis Rugi-Rugi Daya dan Penurunan Tegangan JTR	Peningkatan beban dan panjang saluran menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan.
9.	Septian Pamungkas, dkk.	2022	Evaluasi Efisiensi Jaringan Tegangan Rendah	Susut teknis meningkat akibat panjang jaringan dan ketidaksesuaian spesifikasi penghantar.