

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

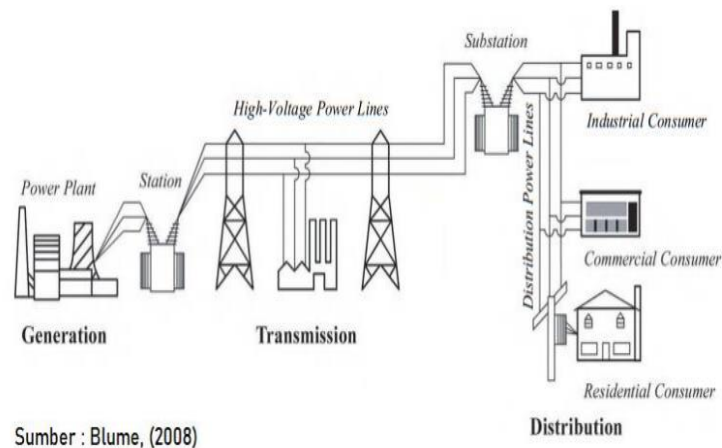
2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem kelistrikan merupakan beberapa rangkaian peralatan yang saling bekerja bersama untuk menghasilkan dan menyalurkan energi Listrik, mulai dari pembangkitan, trans-formator, jaringan transmisi, hingga distribusi. Semua komponen tersebut saling terhubung sehingga membentuk satu kesatuan sistem yang saling terpadu [3].

Sistem kelistrikan diawali dari proses pembuatan Listrik atau yang disebut sebagai pembangkit listrik. Energi ini kemudian di naikan menjadi tegangan tinggi sehingga dapat dikirimkan ke jarak yang jauh. Dalam proses pembangkitan, berbagai sumber energi yang gunakan seperti uap panas, gerak mekanik, air (hidrolik), bahan kimia, sinar matahari, angin, nuklir, dan sumber energi lainnya dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik.

Selanjutnya, energi listrik bertegangan tinggi disalurkan melalui jaringan transmisi untuk mengantarkannya ke daerah-daerah yang membutuhkan. Setelah sampai di gardu induk, tegangan listrik tersebut diturunkan menjadi tegangan yang lebih rendah agar aman dan efisien untuk disalurkan melalui jaringan distribusi. Pada tahap akhir, energi listrik ini didistribusikan dan disesuaikan kembali sesuai kebutuhan untuk digunakan di rumah tangga, sektor komersial, maupun industry.

Oleh karena itu keandalan sistem distribusi menjadi sangat penting karena gangguan yang terjadi dapat mempengaruhi kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Oleh karena itu, analisis kinerja gangguan pada jaringan distribusi diperlukan untuk mengevaluasi tingkat keandalan system [4].



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Kelistrikan

Secara sederhana, sistem tenaga listrik terdapat beberapa bagian utama, yaitu:

- a) Sistem Pembangkitan
- b) Sistem Transmisi (Penyaluran)dan Gardu Induk
- c) Sistem Distribusi (Penjualan)

Ketiga bagian ini saling terhubung dan berperan penting dalam proses menghasilkan, menyalurkan, serta menyalurkan energi listrik hingga sampai ke pengguna akhir.

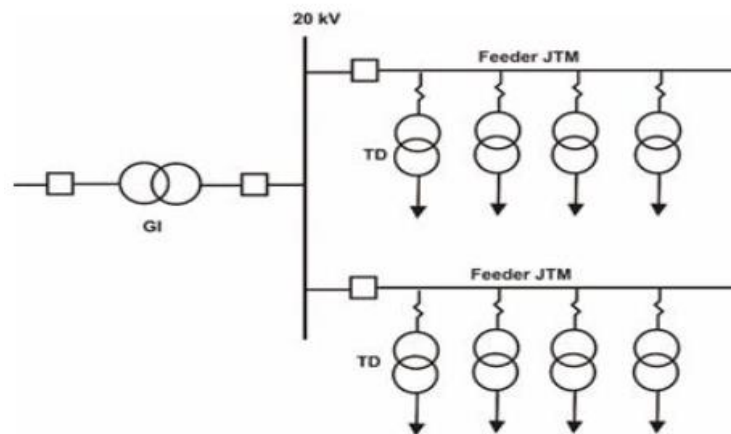
2.1.2 Sistem Distribusi (Penjualan)

Sistem Distribusi merupakan salah satu sistem tenaga listrik yang paling utama di sitem tenaga listrik fungsinya untuk menyalurkan atau membagi tenaga listrik dari pembangkit Listrik sampai kepada pelanggan. Dari saluran transmisi, listrik yang bertegangan tinggi diturunkan menjadi sekitar 20 kV melalui transformator di gardu induk distribusi. Tegangan ini kemudian dialirkan Kembali melalui saluran Tegangan Menengah 20 kV ke gardu-gardu distribusi, kemudian listrik tersebut kembali diturunkan tegangannya hingga menjadi tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Setelah itu, listrik disalurkan melalui saluran distribusi Tegangan Rendah hingga sampai ke pelanggan mulai dari pelanggan rumah tangga, pelanggan bisnis, maupun konsumen lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem distribusi memegang peran yang sangat penting dalam keseluruhan didalam sistem tenaga listrik.

Didalam system Distribusi terdapat jaringan Listrik Distribusi dengan beberapa tipe konfigurasi jaringan, diantara nya :

2.1.2.1 Jaringan Tipe Radial

Jaringan radial adalah bentuk jaringan yang lebih sederhana yang menghubungkan beban-beban titik sumber, biaya relatif murah. Pada struktur radial ini, tidak ada alternatif pasokan, oleh sebab itu keandalannya relatif rendah [5]. Jika terjadi gangguan pada jalur utama yang dekat dengan gardu induk, maka aliran listrik ke seluruh jaringan bisa terputus. Selain itu, struktur ini kurang cocok digunakan untuk wilayah yang sangat luas atau terlalu jauh, karena semakin jauh listrik disalurkan, semakin besar pula risiko terjadinya penurunan tegangan.

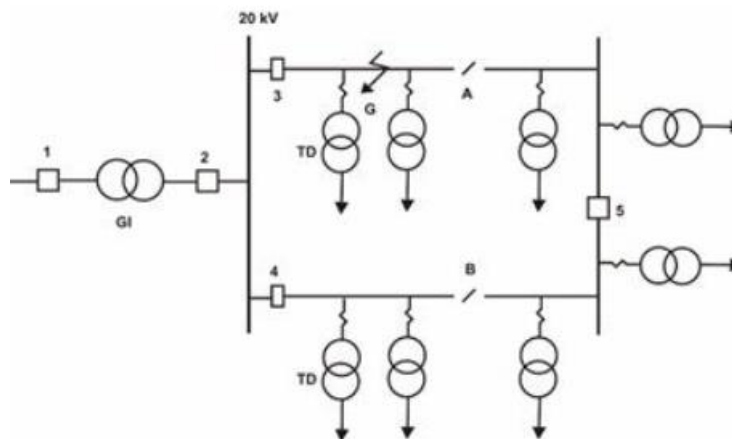


Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial

2.1.2.2 Jaringan Tipe Loop (Tertutup)

Struktur loop adalah jaringan listrik berbentuk lingkaran atau tertutup, yang diawali dari gardu induk, melewati area beban atau trafo, lalu jaringanya Kembali lagi ke gardu induk yang sama. Sistem ini sebenarnya merupakan pengembangan dari struktur jaringan tipe radial. Dalam pengoperasiannya, loop bisa bekerja seperti sistem radial biasa dengan posisi saklar PMT (Pemutus Tegangan) lain terbuka. Jika ada gangguan, bagian jaringan yang bermasalah akan dipisahkan, sementara saklar PMT lain ditutup agar aliran listrik tetap bisa tersalurkan ke konsumen. Karena itu, keandalannya lebih baik dibandingkan sistem

radial. Struktur ini biasanya digunakan di kawasan padat penduduk atau Perkotaan yang tata letaknya mendukung bentuk lingkaran. Namun, biayanya lebih tinggi karena konduktor dan kapasitas yang dipakai harus mampu menanggung seluruh beban apabila salah satu jalur utama dekat gardu induk mengalami gangguan.

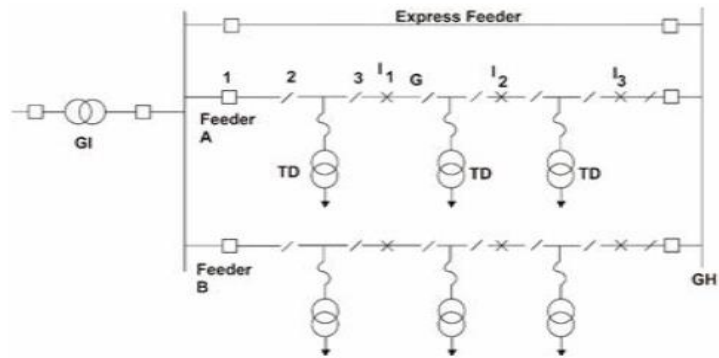


Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Loop

2.1.2.3 Jaringan Tipe Spindel / Mesh

Struktur spindel / Mesh adalah pengembangan dari struktur loop. Kata spindel sendiri berarti gelondong atau kumparan. Pola jaringan ini memiliki ciri khas sendiri yaitu berupa beberapa penyulang / kabel yang keluar dari gardu induk (outgoing cable) menuju satu titik pertemuan yang disebut GH (Gardu Hubung). Di tipe ini terdapat satu penyulang cadangan serta beberapa penyulang utama yang terhubung langsung ke gardu-gardu distribusi, yang dikenal sebagai penyulang kerja/inti.

Apabila ada salah satu penyulang kerja/inti mengalami trip/gangguan, maka gangguan tersebut terlebih dahulu dipisahkan. Setelah itu, saklar PMT di gardu hubung yang terhubung dengan penyulang tadi ditutup, sehingga aliran listrik bisa dialihkan melalui penyulang cadangan. Dengan begitu, suplai aliran listrik tetap hidup dan terjaga meskipun ada gangguan di salah satu jalur.

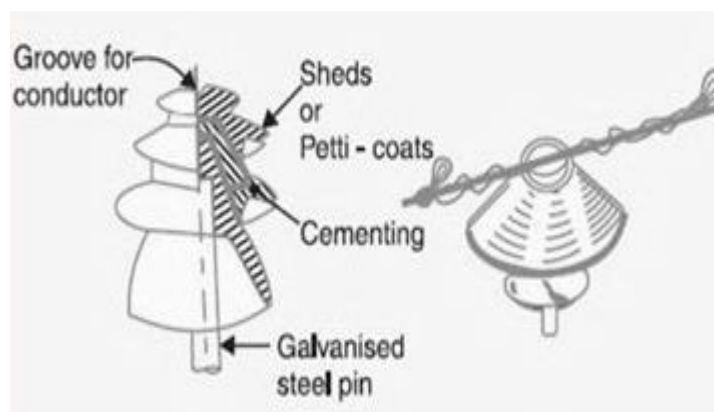


Gambar 2. 4 Konfigurasi Jaringan spindel / Mesh

2.1.3 Isolator Tumpu (Post Insulator)

Isolator tumpu adalah komponen jaringan distribusi yang berfungsi untuk menopang konduktor sekaligus mengisolasi konduktor dari tiang penyangga. Isolator harus memiliki kekuatan mekanis yang baik serta tahan terhadap tegangan listrik tinggi. Jenis material yang umum digunakan antara lain keramik (porcelain), kaca, dan komposit.

Karakter isolator yaitu harus tahan terhadap beda potensial antara konduktor yang dialiri Listrik dan bumi (ground). Jarak antara konduktor dan bumi dan pelepasan aliran Listrik atau medan listrik melalui udara disebut jarak tempuh.



Gambar 2. 5 Kontruksi Isolator pin atau tumpu

Penjelasan Bagian-Bagian:

1. Groove for Conductor

- a) Alur tempat konduktor (kabel listrik) diletakkan dan diikat dengan kawat pengikat (*binding wire*).
 - b) Fungsinya untuk menahan konduktor agar tetap stabil di posisinya.
2. Sheds atau Petti-coats
- a) Bagian menonjol berbentuk payung atau sirip di isolator.
 - b) Fungsinya menambah panjang jalur bocor (*leakage path*) dan mencegah air hujan atau debu menempel langsung di permukaan, sehingga memperbaiki sifat isolasi.
3. Cementing
- a) Bagian di mana badan isolator (biasanya terbuat dari porselen atau bahan komposit) disemen kuat dengan pin baja galvanis.
 - b) Menjamin kekuatan mekanis agar isolator tidak lepas dari penahannya.
4. Galvanised Steel Pin
- a) Pin baja yang dilapisi galvanis untuk mencegah karat.
 - b) Berfungsi menahan isolator pada lengan tiang listrik (*cross-arm*)

ketika isolator basah dikarena air hujan, maka permukaan luarnya bisa menjadi terkonduksi. Oleh sebab itu jarak isolasi isolator akan berkurang sehingga dapat menyebabkan flashover ke ground.

Sehingga dibuatlah desain isolator atas terlihat seperti payung untuk melindungi Sebagian dari permukaan isolator dari air hujan sehingga Sebagian permukaan isolator tetap kering dan dapat memotong aliran arus Listrik dari bagian atas ke bagian bawah isolator. Bagian atas payung cenderung mempertahankan voltase flashover tertinggi saat hujan. Perancangan bentuk isolator dilakukan untuk melindungi distribusi tegangan dari gangguan atau padam Listrik.

2.1.3.1 Material Isolator Jaringan

Bahan material yang digunakan dalam pembuatan isolator merupakan bahan material yang tidak bisa menghantarkan arus Listrik atau isolatif. Meskipun pada kenyataannya setiap bahan tetap memiliki kemampuan menghantarkan arus akan

tetapi dalam jumlah sangat kecil, sehingga nilai tersebut konduktifitas dapat kita abaikan.

Dalam pembuatan isolator padat, pemilihan material harus memperhitungkan aspek biaya dan karakteristik listriknya. Material konvensional seperti feldspar dan quartz relatif mahal dan berat, sehingga penelitian telah mengeksplorasi penggunaan bahan alternatif seperti cangkang telur yang lebih ringan dan ekonomis tanpa mengurangi kemampuan isolasinya [6].

Umumnya, bahan isolator yang digunakan pada jaringan listrik terbuat dari bahan padat, antara lain bahan porselen, bahan kaca, bahan mika, bahan ebonit, bahan keramik, bahan parafin, bahan kuarsa, dan feldspar.

2.1.3.2 Tegangan Breakdown Isolator

Tegangan breakdown pada isolator keramik adalah salah satu nilai parameter yang penting dalam sistem tenaga listrik. Tegangan breakdown sendiri merupakan batas maksimum tegangan yang dapat ditahan isolator sebelum terjadi flash-over atau loncatan listrik yang berpotensi dapat merusak lapisan isolasinya. Mekanisme ini terjadi ketika tegangan yang diberikan melebihi kekuatan dielektrik material keramik. Pada kondisi tersebut, atom dalam struktur kristal keramik mengalami ionisasi, yaitu kehilangan atau menerima elektron sehingga terbentuk ion positif dan negatif di dalam material. Proses ionisasi ini menciptakan jalur konduktif yang dapat memungkinkan arus listrik melewati isolator dan akhirnya dapat menimbulkan hubung singkat antara fasa dan ground, serta mengganggu sistem distribusi listrik.

Adapun faktor-faktor yang memengaruhi tegangan breakdown pada isolator keramik mencakup karakteristik dielektrik material, seperti densitas (kepadatan partikel suatu material), struktur Kristal (susunan atom atau ion di dalam material), dan kemampuan konduksi termal (Kemampuan menghantarkan panas). Selain itu, Kondisi lingkungan seperti tingkat polusi dan kelembaban udara sangat berpengaruh terhadap karakteristik discharge pada permukaan isolator, di

mana peningkatan kelembaban dan polusi akan menurunkan tegangan break-down permukaan isolator [7].

2.1.3.3 Karakteristik Isolator

Isolator Jaringan harus memiliki beberapa karakter yang penting antara lain:

A. Karakteristik Bahan:

1. Memiliki daya tahan mekanis yang tinggi sehingga dapat menahan gaya Tarik atau beban dari konduktor.
2. Memiliki nilai konstanta dielektrik yang tinggi agar mampu menahan tegangan listrik dengan baik.
3. Memiliki resistansi isolasi yang kuat sehingga dapat mencegah kebocoran arus ke tanah.
4. Memiliki rasio tinggi antara kemampuan menahan tegangan pecah dan tegangan loncatan api.
5. Terbuat dari bahan yang padat dan tidak berpori, serta tahan terhadap perubahan suhu.
6. Bebas dari kotoran, retak, atau goresan, sehingga air dan gas dari atmosfer tidak mudah menempel atau merusaknya.
7. Memiliki kombinasi kekuatan dielektrik dan kekuatan mekanis yang baik.
8. Dibuat dari material yang efektif dalam mengisolasi dan menahan tegangan listrik.
9. Memiliki harga yang relatif terjangkau.
10. Tidak memiliki bobot yang terlalu berat, sehingga mudah dalam pemasangan dan pemeliharaan.

B. Karakteristik Elektris

Sebagian isolator umumnya tersusun atas dua elektroda logam, biasanya terbuat dari bahan besi atau dengan campuran bajayaitu bagian atas dan bawah isolator. Kedua bagian tersebut dipisahkan oleh material isolasi. Kekuatan dielektrik suatu isolator sangat dipengaruhi oleh sifat materialnya, termasuk struktur mikroskopis dan karakteristik fisik lain yang menentukan kemampuan bahan

menahan medan listrik sebelum terjadi breakdown. Analisis breakdown strength menunjukkan bahwa variasi material seperti keramik, polimer, dan komposit memberikan perbedaan signifikan dalam kemampuan menahan tegangan tinggi [8].

Jika pada isolator ideal diberi tegangan di kedua elektrodanya, arus hanya mengalir sebentar lalu berhenti. Setelah itu, di dalam bahan isolasi terbentuk muatan listrik (Q). Ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan potensial atau tegangan (V) antara kedua elektroda. Untuk Jumlah muatan yang terbentuk dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q = C \cdot V$$

Dan nilai kapasitas (C) bergantung pada konstanta dielektrik bahan yang berada di antara kedua elektroda. Semakin tinggi konstanta dielektrik suatu bahan isolasi, semakin besar pula kapasitansi yang dimilikinya.

Jika dibandingkan dengan bahan isolasi lainnya, porselin dan kaca memiliki nilai konstanta dielektrik yang lebih tinggi. Berikut nilai Konstante Dilektrikum Beberapa Bahan terdapat dibawah ini :

Tabel 2.1 Nilai Konstanta Dielektrik dari Berbagai Jenis Bahan

Macam Bahan	ϵ	Macam Bahan	ϵ
Ebinit	2,8	Parafin	2,1 - 2,5
Fiber	2,5 - 5	Kertas	2,0 - 2,6
Gelas	5,4 - 9,9	Porselin	5,7 - 6,8
Mika	2,5 - 6,6	Air	2,0 - 3,5
Minyak	2,2 - 6,6	Kayu	2,5 - 7,7

Selain nilai konstanta dielektrik, ukuran luas dan ketebalan bahan juga bisa menentukan besar kecilnya kapasitansi. Semakin besar volumenya, semakin banyak muatan yang bisa ditampung, sehingga kapasitansinya juga semakin tinggi dan dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$C = \epsilon \frac{A}{4\pi d}$$

Dimana :

C = kapasitansi material (Farad)

ϵ = nilai konstanta dielektrikum

A = luas permukaan (m^2)

d = diameter atau tebal material (m)

Nilai Kapasitansi suatu bahan isolasi bisa semakin besar akibat pengaruh kelembaban, debu, suhu panas, kerusakan mekanis, reaksi kimia, maupun tegangan lebih pada permukaannya. Akibatnya, kapasitansi pada isolasi menjadi tidak merata dan cenderung lebih tinggi di bagian yang terkena tegangan. Kondisi ini dapat menimbulkan arus bocor (leakage current) yang mengalir di permukaan bahan. Meskipun begitu, arus bocor ini nilainya relatif kecil dibandingkan dengan arus yang lewat di dalam bahan isolasi, yang besarnya Adalah :

$$I_1 = \frac{V}{R_i}$$

Dimana :

I_1 = arus kebocoran (Ampere)

V = tegangan yang melaluinya (Volt).

R_i = tahanan isolasi (Ω)

Dalam perancangan sistem tenaga listrik, basic insulation level (BIL) tidak dapat diabaikan. BIL merupakan batas operasional tegangan maksimum sebelum isolator mengalami flashover. Selain harus mampu menahan tegangan, isolator juga harus mampu menahan kondisi lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan polusi, yang dapat memengaruhi kinerja isolator [9].

Basic Insulation Level (BIL) adalah batas maksimum tegangan operasi yang dapat ditahan oleh isolator sebelum terjadi loncatan listrik (flashover). Setiap tingkat tegangan nominal memiliki nilai BIL yang berbeda. Misalnya, untuk tegangan nominal 15 kV nilai BIL-nya adalah 110 kV, tegangan 25 kV memiliki BIL sebesar 150 kV, dan untuk tegangan 34,5 kV nilai BIL-nya mencapai 200 kV.

C. Karakteristik Mekanis

Porcelain sebagai bahan isolator keramik memiliki kekuatan mekanis yang tinggi, dengan kuat tekan sekitar 70.000 kg/cm² dan kuat tarik sekitar 500 kg/cm². Material ini juga memiliki sifat dielektrik yang baik dan ketahanan

mekanik yang kuat, sehingga banyak dipilih dalam konstruksi isolator untuk jaringan tenaga listrik [10].

Untuk memastikan performa isolasi yang optimal, isolator berbahan porselin harus diproduksi tanpa lubang, goresan, atau retakan, karena cacat permukaan seperti retakan dapat menyebabkan penurunan kemampuan isolasi dan berpengaruh terhadap ketahanan terhadap perubahan suhu dan benturan [11].

2.1.3.4 Penyebab kerusakan pada Isolator.

Yang menyebabkan rusak nya pada isolator jaringan distribusi umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor (Sariadi, 1997:144), antara lain:

1. Usia isolator yang sudah tua, sehingga kemampuan isolasinya menurun
2. Gangguan mekanis, misalnya akibat benturan atau getaran yang kuat.
3. Paparan panas berlebih yang melebihi batas toleransi bahan isolator.
4. Kesalahan dalam proses pemasangan, yang dapat menyebabkan isolator tidak bekerja secara optimal.

2.1.4 Gaya-Gaya Mekanis Pada Tiang

Gaya Mekanis dalam jaringan distribusi dipengaruhi oleh beberapa factor :
(SPLN : Buku 1- Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi).

2.1.4.1 Jarak antar tiang (Jarak gawang)

Tiang-tiang pada saluran distribusi dipasang mengikuti jalur penyaluran eksisting sehingga memiliki daya mekanik berbeda-beda dan untuk mencari jarak rata rata pada jaringan dapat menggunakan rumus :

$$a_{rata-rata} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{Jmlh\ Gawang}$$

2.1.4.2 Berat penghantar dan gaya berat penghantar

Untuk mencari Berat penghantar pada jaringan dapat menggunakan rumus :

Gaya berat penghantar = $m \times L \times g$.

Dimana : m = massa penghantar (kg/m)

g = gravitasi (m/s^2)

L = Panjang Penghantar (m)

dan untuk mencari Panjang pada suatu jaringan dapat menggunakan rumus berikut:

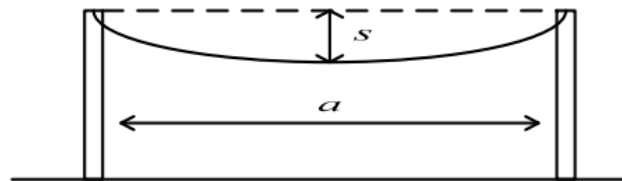
$$L = a \frac{8s^2}{3a}$$

Dimana :

L = Panjang penghantar (m)

a = jarak gawang (m)

s = Panjang andongan/sag (m)



Gambar 2.6 Jarak tiang

sehingga Berat penghantar dapat dihitung berdasarkan panjang actual.

Tabel 2.2 Berat penghantar All Aluminium Alloy Conductor (AAAC)

Ukuran (mm ²)	Berat teoritis solid (kg/m)	Berat praktis stranded (kg/m)	Berat praktis stranded (kg/km)
35	0.09450	0.09639	96.39 kg/km
50	0.13500	0.13770	137.70 kg/km
70	0.18900	0.19278	192.78 kg/km
95	0.25650	0.26163	261.63 kg/km
120	0.32400	0.33048	330.48 kg/km
150	0.40500	0.41310	413.10 kg/km
185	0.49950	0.50949	509.49 kg/km
240	0.64800	0.66096	660.96 kg/km

2.1.5 Keandalan Sistem Distribusi

Jaringan Sistem distribusi merupakan bagian dari jaringan listrik yang berfungsi mengalirkan energi listrik kepada pelanggan, sehingga harus memperhatikan kualitas dan keandalannya agar pasokan listrik tetap stabil. Upaya untuk memenuhi

kebutuhan energi listrik tidak hanya dengan menambah kapasitas daya, tetapi juga dengan meningkatkan keandalan pelayanan. Seringnya pemadaman bisa berdampak serius, baik bagi pelanggan besar maupun kecil. Oleh karena itu, menjaga kontinuitas layanan menjadi faktor penting dalam memastikan keandalan listrik, yang dapat dilihat dari lama dan frekuensi gangguan.

Keandalan sistem distribusi diukur dengan beberapa indeks, di antaranya:

- a) Nilai saifi (system average interruption frequency index): nilai rata-rata frekuensi gangguan yang dialami pelanggan.
- b) Nilai saidi (system average interruption duration index): rata-rata lama gangguan yang dialami pelanggan.

2.1.5.1 Teori Dasar Jenis Gangguan

Pada dasarnya gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi 20 kV di golongan menjadi dua macam yaitu gangguan dari dalam dan luar sistem. Gangguan dari luar sistem biasanya disebabkan oleh hewan, pohon, cuaca dan lain lain. Sedangkan gangguan dari dalam sistem dapat berupa kegagalan dan kerusakan dari fungsi peralatan maupun kesalahan dari alat pendeteksi [12].

Menurut pendapat Hutaeruk dalam karangan buku yang berjudul Pengetahuan Netral Sistem Tenaga dan Pengetahuan Peralatan [13], gangguan pada jaringan distribusi di klasifikasi antara lain:

1. Jenis Gangguan

- a) Gangguan hubung singkat tiga fasa
- b) Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah
- c) Gangguan hubung singkat dua fasa
- d) Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah
- e) Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah atau gangguan tanah

Gangguan Hubung Singkat

Pada sistem distribusi umumnya mempunyai beberapa gangguan yang terdiri dari gangguan hubung singkat antar fasa, tiga fasa, dua fasa ke tanah, satu fasa ke tanah. Hal yang dapat diakibatkan dari gangguan hubung singkat

ini, yaitu akan menimbulkan arus lebih / arus hubung singkat yang lamanya tergantung pada penyetelan relai yang ada pada outgoing feeder [14].

Untuk mengatasi gangguan yang terjadi, perlu dilakukan suatu analisis hubung singkat sehingga penyetelan pada alat Proteksi yang tepat dapat dilakukan dengan benar. Analisis hubung singkat adalah suatu analisis yang mempelajari tentang arus gangguan hubung singkat yang terjadi pada setiap cabang didalam sistem (di jaringan distribusi, transmisi, trafo tenaga atau dari pembangkit) sewaktu gangguan hubung singkat itu terjadi.

2. Waktu Gangguan

a) Gangguan Permanen

Gangguan permanen adalah gangguan tidak akan dapat hilang sebelum penyebab gangguan dihilangkan terlebih dahulu, gangguan bersifat permanen bisa jadi disebabkan oleh kerusakan peralatan sehingga gangguan ini akan normal bila kerusakan tersebut sudah selesai diperbaiki. Contoh gangguan : adanya konduktor putus , adanya isolator rusak/pecah sehingga terjadinya hubung singkat fasa-fasa atau fasa-ground.

b) Gangguan temporer

Gangguan Temporer adalah gangguan yang terjadi hanya sesaat atau tidak lama, gangguan bersifat temporer ini dapat hilang dengan sendirinya atau penyulang dapat masuk normal tanpa diketahui unsur penyebab gangguan tersebut. akan tetapi apabila gangguan temporer sering terjadi maka hal ini akan menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

2.1.5.2 Standar SPLN 68-2:1986

Didalam SPLN ini untuk Standar nilai yang ditetapkan untuk keandalan sistem distribusi nasional, antara lain: aidi : maksimal 21 jam per pelanggan per tahun. Dan Saifi : maksimal 3,2 kali per pelanggan per tahun.

a) SAIDI (System Average Interruption Duration Index) adalah indeks durasi atau lama pemadaman rata –rata tiap tahun yang merupakan dari

perkalian lama padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani [15].

$$SAIDI = \frac{\sum u_i \cdot n_i}{\sum N}$$

Dimana :

u_i adalah durasi pemadaman/gangguan

n_i adalah jumlah pelanggan padam

N adalah jumlah pelanggan yang terlayani

- b) SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) adalah indeks frekuensi pemadaman rata-rata tiap tahun yang merupakan jumlah dari perkalian frekuensi padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani [15].

$$SAIFI = \frac{\sum n_i}{\sum N}$$

Dimana :

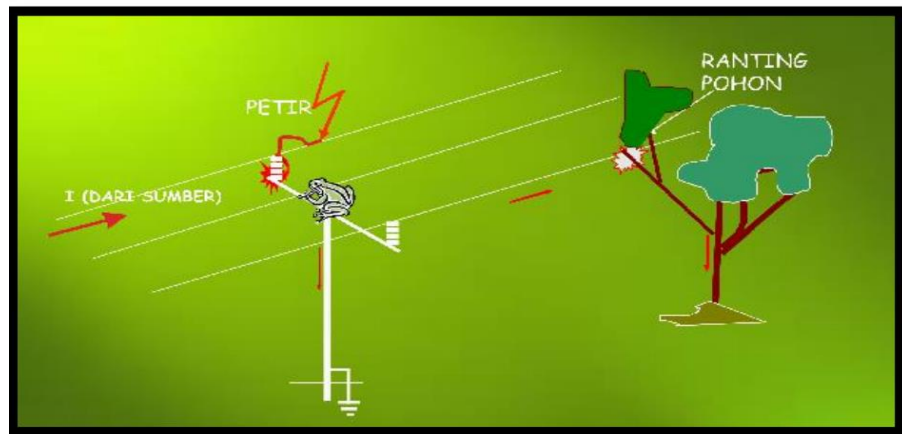
n_i adalah jumlah pelanggan padam

N adalah jumlah pelanggan yang terlayani

2.1.5.3 Faktor Penyebab Gangguan

Ada beberapa faktor yang dapat menimbulkan gangguan pada sistem distribusi, antara lain:

1. Usia peralatan yang sudah lama atau tua.
2. Gangguan mekanis, seperti benturan atau kerusakan fisik lainnya.
3. Panas berlebih yang diakibatkan oleh beban lebih atau over current.
4. Kesalahan pemasangan atau instalasi yang tidak sesuai standar.
5. Surja petir atau surja hubung
6. Gangguan External



Gambar 2. 7 Faktor Penyebab Gangguan

2.1.5.4 Upaya Peningkatan Keandalan

Untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi, beberapa langkah yang dapat dilakukan antara lain:

1. Pemeliharaan preventif secara rutin pada peralatan distribusi.
2. Peningkatan kualitas instalasi dan penggantian peralatan yang sudah usang.
3. Penerapan teknologi digital untuk pemantauan dan deteksi dini gangguan.
4. Edukasi dan pelatihan bagi petugas lapangan mengenai prosedur operasional standar.

2.1.5.5 Sistem Proteksi Distribusi Jaringan Tegangan Menengah

System Proteksi merupakan salah satu alat didalam sistem kehandalan sistem distribusi yang sangat didambakan dalam pemasok atau penyaluran listrik ke pelanggan, karena sitem proteksi ini dapat selektif ketika terjadinya gangguan di sistem distribusi. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem proteksi pada sistem distribusi tenaga listrik yang baik sehingga jika terdapat gangguan hubung singkat di jaringan atau peralatan listrik tidak menyebabkan pemadaman meluas pada seluruh sistem distribusi tenaga listrik.

A. Syarat Peralatan Proteksi

Sistem proteksi dalam jaringan distribusi tenaga listrik berfungsi sebagai pengaman yang dirancang untuk mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal

dan secara cepat memisahkan bagian yang terganggu agar bagian lainnya tetap beroperasi secara normal, sehingga keandalan sistem tenaga listrik tetap terjaga [16].

Ada beberapa syarat agar dapat berjalan sesuai fungsinya sebagai pengaman peralatan distribusi tenaga listrik. Syarat-syarat tersebut agar supaya dipenuhi oleh setiap peralatan proteksi, sehingga sistem proteksi dapat berjalan dengan baik sesuai dengan fungsinya. Adapun beberapa persyaratan sistem proteksi yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut :

1. Kepekaan (Sensitivity)

Peralatan proteksi harus dapat mendeteksi gangguan sekecil apapun yang berada pada daerah yang diamankan. Dengan sistem proteksi yang sensitif ini seluruh gangguan yang berada pada daerah yang diamankan akan termonitor kemudian akan direspon (proteksi bekerja / trip).

2. Handal (Reability)

Peralatan proteksi dalam setiap menjalankan fungsinya harus handal (tidak gagal trip saat gangguan terjadi) dan tidak salah trip (false trip) saat kondisi normal. Contoh: Relay proteksi tetap berfungsi meski kondisi di lingkungan ekstrim dan dapat memutus rangkaian dengan tepat ketika terjadi arus hubung singkat.

3. Selektifitas (Selectivity)

Proteksi dapat dikatakan selektif apabila bisa memilih daerah yang terganggu saja. Pada prinsipnya peralatan proteksi hanya boleh bekerja bila ada gangguan di daerah kawasan yang diamankan saja. Jika gangguan terdapat pada wilayah kawasan pengaman utama maka proteksi harus dapat bekerja. Dan jika gangguan yang terjadi di luar wilayah kawasan pengamannya maka proteksi tidak boleh ikut bekerja.

4. Kecepatan (Speed)

Agar proteksi bisa mencapai manfaat yang maksimal, sistem proteksi harus dapat bekerja dengan cepat. Apabila proteksi tidak dapat bekerja dengan cepat maka kemungkinan kerusakan pada peralatan akan lebih banyak. Maka dari itu perlu dipasang proteksi lebih dari satu dan diberi setting waktu lebih tinggi dari

proteksi utama agar memberi kesempatan proteksi utama bekerja terlebih dulu. Menurut standar IEC 60255-151 (Overcurrent Protection Standards) and IEEE C37.91 untuk waktu operasi instansius maksimal 20-50 ms.

B. Tujuan Peralatan Proteksi

Adapun tujuannya dari pemasangan Peralatan proteksi adalah untuk keamanan (baik itu keamanan peralatan maupun kemanan terhadap makhluk hidup) sehingga pendistribusian tenaga listrik kepada pelanggan berjalan dengan baik. Ada beberapa hal penjelasan terhadap tujuan dari pemasangan peralatan proteksi, yaitu :

1. Meminimalisir terjadinya kerusakan peralatan akibat adanya gangguan di sytem distribusi listrik, seperti tranformator, Generator. Peralatan ini merupakan peralatan yang sangat vital dalam system tenaga listrik. Dengan adanya peralatan proteksi ini dapat memerintahkan open/trip ketika ada arus gangguan yang sangat besar yang bisa merusak pada peralatan utama.
2. Meminimalisir daerah gangguan padam, sehingga wilayah lain yang jauh dari titik gangguan tidak terdampak pemadaman.
3. Dapat meningkatkan Mutu pelayanan listrik terhadap pelanggan.
4. Untuk memberikan keamanan bagi manusia, makhluk hidup, atau benda lain yang berada di sekitar peralatan Listrik.

2.1.6 SISTEM SCADA

Sistem merupakan sekumpulan perangkat atau komponen yang saling terhubung membentuk satu kesatuan dan berfungsi secara terpadu, sedangkan SCADA merupakan singkatan dari Supervisory Control And Data Acquisition, sehingga Sistem SCADA merupakan sebuah metode dalam sistem kontrol, yang mana seorang operator dapat melakukan fungsi kontrol (controlling), pengawasan (monitoring) dan pengambilan rekaman data (data acquisition) dari sebuah sistem yang sedang bekerja. Dalam sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), data dari perangkat lapangan dikumpulkan secara real-time dan kemudian dikirimkan ke pusat pengendalian untuk dipantau dan dikendalikan dari jauh. SCADA secara

efektif digunakan dalam pengelolaan pembangkit listrik, termasuk pembangkit tenaga surya, untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi monitoring serta kontrol operasi sistem tenaga listrik secara terpadu [17].

Secara umum, pengendalian jarak jauh pada sistem tenaga listrik terdiri dari empat macam [18], yaitu:

1. Pengendalian untuk buka/tutup pada peralatan PMT/PMS serta start/stop dari generator.
2. Pengendalian peralatan-peralatan regulator seperti pengaturan set point atau menaikkan dan menurunkan posisi tap changer pada transformator daya.
3. Pemantau dan pengaturan beban secara real time.
4. Pengendalian yang berlangsung secara otomatis guna menjaga konsistensi serta menjalankan perintah secara berurutan, contohnya saat melakukan perubahan konfigurasi jaringan.

2.1.6.1 Proses Pengendalian Dengan Sistem SCADA

Sistem SCADA bisa dioperasikan dari pusat kontrol melalui komputer utama (main computer). pada tampilan komputer tersebut, seorang dispatcher bisa memantau serta sekaligus mengendalikan aliran listrik jaringan listrik, khususnya jaringan distribusi milik PT PLN (Persero) Distribusi Lampung.

Saat seorang dispatcher mengirimkan suatu perintah melalui komputer, komputer utama akan menyampaikan sinyal tersebut ke Remote Terminal Unit (RTU) melalui media komunikasi. Jika media komunikasinya bermasalah, sinyal itu bisa gagal sampai kepada RTU. Maka dari itu, diperlukan sistem komunikasi yang andal agar perintah dapat diteruskan dengan cepat dan tepat.

Ketika RTU tersebut menerima sinyal dari komputer utama, RTU akan menjalankan instruksi yang diberikan, misalnya perintah membuka atau menutup PMT (Pemutus Tenaga), PMS (Pemisah Tenaga), atau LBS (Load Break Switch). Setelah perintah sudah dilaksanakan, RTU akan mengirimkan kembali sinyal ke komputer utama sebagai konfirmasi bahwa perintah sudah di

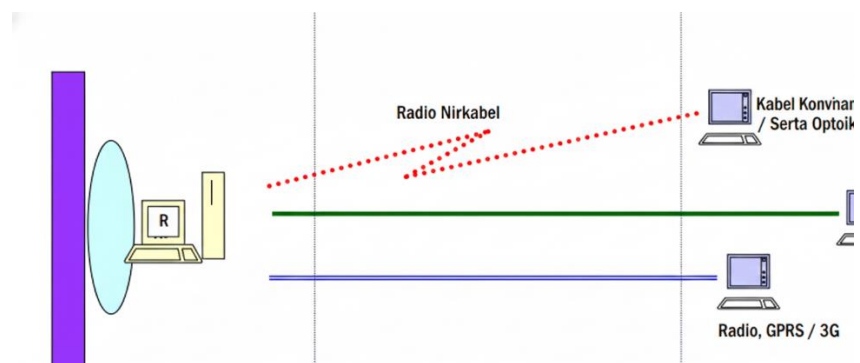
laksanakan dengan cara dispatcher dapat melihat langsung status PMT, PMS, atau LBS apakah dalam kondisi terbuka atau tertutup di layar komputer utama.

Pusat kontrol atau Master Station berfungsi sebagai komputer utama (server). Biasanya terdapat dua unit komputer utama untuk membentuk sistem ganda (Master/Slave). Tujuannya adalah agar sistem tetap beroperasi meskipun salah satu komputer mengalami gangguan. Jika komputer Master terdapat masalah dan aplikasinya tiba-tiba berhenti, komputer Slave otomatis mengambil alih sebagai Master sehingga ketersediaan sistem tetap terjaga.

Adapun fungsi utama dari komputer utama adalah:

- a) Mengatur proses komunikasi antara komputer utama dan RTU.
- b) Menerima dan mengirim data dari RTU, lalu mengolahnya menjadi informasi yang mudah dipahami oleh pengguna.

Selain itu, komputer utama juga bertugas mendistribusikan informasi tersebut ke MMI (Main Machine Interface), mimic board, printer logger, serta menyimpan data tersebut dalam bentuk file.

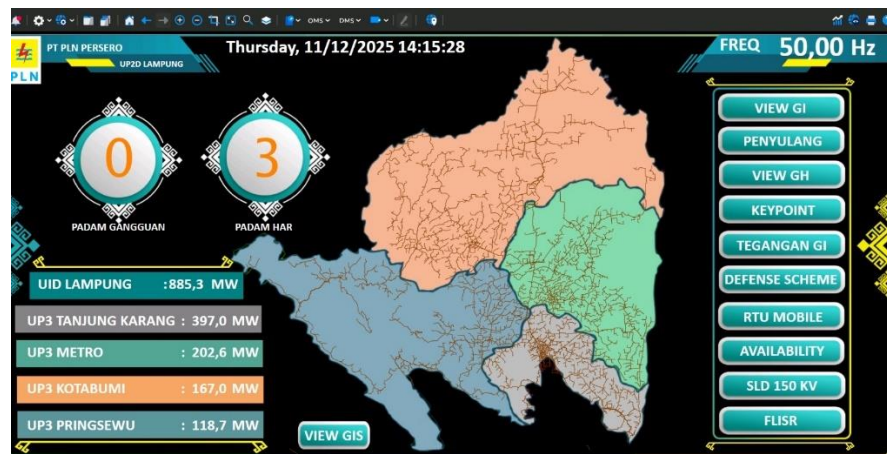


Gambar 2.8 Proses Pengendalian Dengan Sistem Scada

Pada sisi kiri terdapat sebuah komputer yang berfungsi sebagai Stasiun Jarak Jauh atau RTU, berupa Remote Terminal Unit (RTU) atau Programmable Logic Controller (PLC), yang ditandai dengan huruf "R" pada layarnya. Komputer ini terhubung dengan sebuah objek atau perangkat yang digambarkan sebagai lingkaran berwarna ungu yang menjadi elemen yang dikendalikan. Sementara itu, pada sisi kanan berada pusat kontrol atau master, yang terdiri dari sedikitnya dua

komputer. Kedua komputer ini menerima sinyal dari sisi kiri melalui berbagai media komunikasi, seperti kabel, radio, GPRS, atau jaringan 3G.

Yang mana pada gambar diatas Terdapat 3 Jalur berlabel “Kabel Konvensional/serat optic” digambarkan dengan garis hijau solid dan menunjukkan sambungan kabel konvensional yang menghubungkan perangkat di sisi kiri—kemungkinan RTU atau PLC—dengan komputer di pusat kontrol. Selain itu, terdapat jalur nirkabel yang disimbolkan oleh garis merah putus-putus, yang menggambarkan komunikasi radio sebagai alternatif atau cadangan, terutama untuk lokasi yang sulit dijangkau kabel. Selanjutnya, garis biru solid berlabel “Radio, GPRS/3G” mewakili jalur komunikasi menggunakan teknologi seluler atau radio, yang menghubungkan perangkat di lapangan ke komputer lain di sisi control [19].



Gambar 2.9 Monitoring SCADA Penyulang UID Lampung

2.1.7 Energi Not Sale

Energi non-sale atau sering kita sebut juga Non-Revenue Energy (NRE) maupun Non-Technical Losses (NTL), adalah energi listrik yang sudah dibangkitkan oleh pembangkit Listrik dan dialirkan melauli jaringan listrik, tetapi tidak tercatat sebagai energi yang terjual ke pelanggan. Singkatnya, NRE adalah selisih antara jumlah listrik yang masuk ke perhitungan sistem distribusi dengan listrik yang benar-benar bisa ditagihkan ke konsumen dalam bentuk rekening listrik. Kondisi ini

menjadi masalah besar bagi perusahaan listrik karena berpotensi menimbulkan kerugian finansial sekaligus menurunkan efisiensi penyaluran Listrik [20].

Salah satu penyebab terjadinya energy not sale adalah adanya gangguan pada jaringan distribusi, yang mengakibatkan terhentinya aliran listrik ke pelanggan. Akibatnya, energi listrik yang telah dihasilkan oleh pembangkit PLN tidak dapat tersalurkan secara optimal, bahkan bisa tidak tersalurkan sama sekali. Kondisi ini menyebabkan tidak adanya penjualan listrik, sementara biaya operasional pembangkitan tetap berjalan.

Dan juga Gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik menghasilkan arka listrik yang memanaskan material sekitar secara signifikan, sehingga energi listrik yang hilang terdisipasi sebagai panas dan menyebabkan karakteristik termal tertentu pada sistem distribusi [21].

2.1.7.1 Daya Listrik

Daya listrik bisa diartikan sebagai kecepatan aliran energi listrik dalam sebuah rangkaian. Besarnya daya menunjukkan seberapa cepat listrik dipakai atau diubah menjadi bentuk energi lain, seperti cahaya pada lampu, panas pada setrika, atau gerak pada kipas angin. Secara umum, satuan yang digunakan untuk mengukur daya listrik adalah Watt (W) [22].

Dimana : $1 \text{ W} = 1 \text{ joule/detik}$

2.1.7.2 Rumus Daya Listrik.

Untuk sistem tiga fasa yang berada dalam kondisi seimbang, dapat dicari menggunakan rumus dibawah ini:

$$P = V \times I \times \sqrt{3} \times \cos\phi$$

Dimana :

P = Daya Listrik (Watt)

V = Tegangan fasa-fasa (Volt)

I = Arus (Ampere)

Cos ϕ = factor daya

2.1.7.3 Energi

Nilai Energi listrik adalah hasil kali daya Listrik dengan lama waktu penggunaannya :

$$E = P \times t$$

Dimana :

E = Energi Listrik (Wh)

t = Waktu (jam)

2.2 Penelitian yang Relevan

Menurut jurnal yang saya cari belum ada jurnal yang menjelaskan secara spesifik tentang isolator tumpu jenis tertentu, akan tetapi ada beberapa jurnal yang mendekati tentang penyebab mekanis kerusakan isolator, energi hilang akibat gangguan isolator dan dampak langsung terhadap kehandalan jaringan,

2.2.1 Mekanisme Kerusakan Isolator

1. Kontaminasi permukaan dan flashover: Debu, garam, asap industri, dan kelembaban mengakumulasi di permukaan isolator sehingga membentuk film konduktif pada kondisi basah. Hal ini menurunkan tegangan flashover permukaan dan meningkatkan kemungkinan gangguan (surface discharge / flashover). Penelitian eksperimental dan lapangan menunjukkan bahwa distribusi kontaminasi dan kondisi kelembaban berperan besar pada tegangan flashover [23].
2. Kerusakan mekanis / kelelahan material: Beban mekanis (angin, beban es) atau kecacatan produksi (retak pada inti porselen atau pemisahan cap-to-pin) dapat menyebabkan kegagalan struktural dan terlepasnya konduktor. Beberapa studi failure-analysis menekankan bahwa patahnya inti atau pemisahan komponen menyebabkan gangguan total dan drooped conductor.
3. Degradasi material pada isolator komposit: Untuk isolator SiR, kehilangan sifat hidrofobisitas (mis. akibat polusi berat) menurunkan ketahanan terhadap flashover; sedangkan untuk porselen, penetrasi air melalui retak dapat mempercepat degradasi [24].
4. Kegagalan internal / manufaktur: Inklusi material, porositas, atau ikatan yang buruk antara cap dan pin dapat menyebabkan titik lemah yang berkembang menjadi cacat kritis [25].

2.2.2 Energi Hilang Akibat Gangguan (Fault Energy)

Gangguan pada isolator (mis. flashover, short-circuit, jatuhnya konduktor) dapat menyebabkan aliran arus gangguan yang besar selama periode pendek. Energi yang hilang selama gangguan (fault energy) berhubungan langsung dengan arus gangguan, impedansi sirkuit, dan durasi pemutusan/isolasi. Energi ini berdampak pada:

- a) Kerusakan peralatan (mis. pemutus, transformator) akibat thermal / mekanis,

- b) Pengeluaran energi yang tidak tersalurkan ke pelanggan (losses selama gangguan),
- c) Dan Konsekuensi operasional (perbaikan, penggantian isolator, pemadaman).

Literatur teknis menjelaskan bahwa kuantifikasi energi gangguan penting untuk desain proteksi dan pemilihan peralatan pemutus arus serta untuk estimasi biaya pemulihan. Selain itu, frekuensi dan durasi gangguan mempengaruhi akumulasi energi hilang sepanjang tahun operasi [26].

2.2.3 Dampak Kerusakan Isolator terhadap Keandalan Jaringan Distribusi 20 kV

1. Keandalan sistem distribusi biasanya dinilai menggunakan indeks seperti saifi (system average interruption frequency index), saidi (system average interruption duration index). Dan kerusakan material isolator tumpu juga dapat mempengaruhi indeks-indeks ini melalui:
 - a) Peningkatan frekuensi gangguan (SAIFI): Isolator yang sering mengalami flashover atau mekanikal gagal akan menyebabkan lebih banyak gangguan singkat atau panjang [27].
 - b) Peningkatan durasi gangguan (SAIDI): Gangguan karena kerusakan mekanik (mis. jatuhnya konduktor) biasanya memerlukan waktu perbaikan lebih lama dibanding gangguan sementara, sehingga menambah durasi rata-rata pemadaman [28]
2. Beberapa studi analitis dan praktis menekankan bahwa pemeliharaan preventif pada isolator (inspeksi visual, pengukuran arus bocor, thermography, uji UV/PD) secara signifikan menurunkan tingkat kegagalan dan memperbaiki parameter keandalan [29].

Tabel 2.3 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	Influence for Ambient Relative Humidity and Pollution on Infrared Detection of Zero Resistance Insulators (L. Chen dan rekan-rekan, 2022)	Meneliti bagaimana kelembapan dan polusi udara memengaruhi akurasi deteksi kondisi isolator dengan teknologi inframerah.	Melakukan uji laboratorium dengan variasi kelembapan dan polusi pada berbagai isolator, lalu memantau suhu permukaannya memakai kamera inframerah untuk mendeteksi anomali panas.	Hasilnya menunjukkan bahwa meningkatnya kelembapan dan polusi membuat suhu isolator naik, menandakan konduktivitas dan risiko flashover yang lebih tinggi. Deteksi inframerah terbukti efektif mengenali isolator bermasalah.	Penelitian ini belum membahas kaitan hasil deteksi dengan rugi energi atau keandalan sistem 20 kV, serta tidak meneliti merk isolator twink.

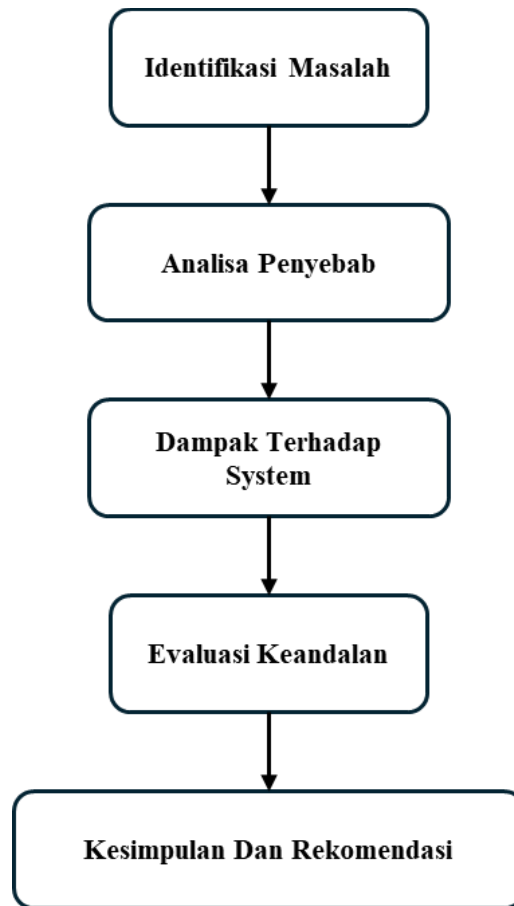
Tabel 2.3 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
2.	Overview of Failure Modes of Line Insulators (INMR, 2023)	Menganalisis dan membandingkan mode kegagalan isolator udara (kaca, porselen, polimer) guna memahami penyebab utama gangguan pada sistem transmisi dan distribusi listrik.	Melakukan kajian lapangan dan analisis forensik pada isolator rusak melalui pemeriksaan visual, uji mekanik, uji flashover, dan studi lingkungan	Kerusakan disebabkan oleh degradasi material, retakan, polusi, dan penuaan. Porselen umumnya gagal karena retak, sedangkan polimer karena degradasi permukaan.	Tidak meneliti isolator tumpu Twink 20 kV serta tidak menganalisa pengaruh kerusakan terhadap rugi energi dan keandalan jaringan.
3.	Probabilistic analysis of the failure of high-voltage insulators based on compositional analysis,(S. Sanyal,dkk)	Mengembangkan model probabilistik untuk memprediksi kegagalan isolator berdasarkan bahan, kondisi cuaca, dan lama pemakaian.	Menganalisis komposisi kimia isolator serta mensimulasikan tingkat kegagalan dengan distribusi Weibull dan metode Monte Carlo.	Umur isolator dipengaruhi oleh bahan dan lingkungan. Isolator polimer tahan polusi, namun cepat menurun pada suhu ekstrem.	tidak meneliti isolator merk Twink 20 kV dan kaitannya dengan keandalan sistem atau rugi energi. Akan tetapi Pendekatan probabilistik ini bisa

Tabel 2.3 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
					diterapkan untuk menghitung potensi gangguan akibat isolator tumpu.
4.	Moving Beyond Average Reliability Metrics,(Chris Watts, C. McCarthy, dan B. Levite,2020)	Menyoroti keterbatasan indikator keandalan seperti SAIDI, SAIFI, dan CAIDI dalam menggambarkan performa jaringan listrik secara menyeluruh.	Menganalisis studi kasus sistem distribusi dengan membandingkan metrik konvensional dan metrik baru berbasis <i>Customer Damage Function (CDF)</i> untuk menilai dampak ekonomi gangguan.	Metrik lama tidak sepenuhnya mencerminkan dampak sebenarnya bagi pelanggan, sehingga diperlukan metrik baru yang mempertimbangkan durasi, frekuensi, dan biaya gangguan.	Belum memperhitungkan kerugian gangguan akibat gangguan isolator.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.10 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mengenali masalah apa yang terjadi di lapangan. Banyak isolator tumpu terutama merk Twink keluaran tahun 2009 yang digunakan pada jaringan distribusi 20 kV mengalami kerusakan berupa pecah/retak, sehingga menuntut adanya penggantian. Dari temuan ini, penulis merasa perlu dicari lebih mendalam mengenai apa penyebab kerusakan pada isolator tersebut.

Proses analisa kemudian difokuskan pada beberapa faktor yang diduga memengaruhi terjadinya kerusakan, seperti kualitas pada material, usia pemakaian, kondisi lingkungan sekitar, dan beban mekanis yang diterima oleh isolator selama dipasang. Dari sini, penulis mulai memahami bahwa kerusakan isolator bukan sekadar masalah teknis saja, akan

tetapi juga bisa berdampak nyata terhadap keberlangsungan sistem distribusi Listrik dalam penjualan listrik.

Gangguan yang muncul diakibatkan isolator yang rusak tidak bisa dianggap remeh, karena dapat menyebabkan gangguan hubung singkat, trip pada penyulang, mulai dari gangguan sesaat yang penyebabnya tidak ditemukan hingga pemadaman yang lama yang tentunya dapat merugikan pelanggan maupun perusahaan. Untuk dapat melihat seberapa besar pengaruh gangguan yang disebabkan oleh isolator terhadap keandalan jaringan dan kWh yang tidak terjual, dengan dilakukan evaluasi menggunakan indeks SAIDI, SAIFI dan perhitungan ENS dengan memanfaatkan data logsheet gangguan dan pemeliharaan dari PLN UID Lampung.

Akhirnya, melalui rangkaian analisa ini, penulis berharap penelitian ini mampu memberikan gambaran solusi yang bisa diterapkan, terutama dalam hal pemeliharaan, penggantian isolator dan dalam pengadaan material. Dengan begitu, keandalan sistem distribusi dapat lebih terjaga, dan layanan listrik yang sampai ke masyarakat bisa semakin andal, efisien dan berkelanjutan.