

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

- a) Girindra, dkk . (2020)

Studinya, "Tekep Isolator Gardu untuk Menanggulangi Gangguan Binatang Tupai", menjelaskan bahwa perangkat pelindung yang dipasang pada gardu distribusi pasangan luar untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik. Pemasangan alat ini sangat penting untuk mengurangi gangguan hubung singkat yang dapat terjadi saat berinteraksi dengan hewan, terutama tupai. Jika gangguan hubung singkat dibiarkan begitu saja, halter tersebut dapat mengganggu sistem daya, bahkan mengganggu penyulang lain yang masih berfungsi normal. Akibatnya, penerapan tekep isolator gardu dianggap sebagai tindakan pencegahan yang berguna untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga.

- b) (Rifai et al., 2023).

Prinsip dasar kelistrikan mengatakan bahwa konduktor adalah bahan yang dapat menghantarkan arus listrik, dan isolator melindungi konduktor agar tidak terjadi hubungan arus yang tidak diinginkan. Material isolasi mencegah kebocoran arus, meningkatkan kinerja sistem, dan mengurangi risiko gangguan dan kecelakaan listrik.

Menurut beberapa penelitian, beberapa jenis bahan biasa digunakan untuk isolasi konduktor. Ini termasuk polietilen, karet, dan PVC (polyvinyl chloride), yang dikenal memiliki ketahanan tinggi terhadap kelembapan dan sifat dielektrik yang baik, sehingga banyak digunakan pada kabel tegangan rendah. Sementara itu, karet dan bahan berbasis elastomer menawarkan stabilitas termal yang lebih baik dan ketahanan terhadap sinar UV.

c) Dewan, dkk. (2022)

melakukan penelitian yang disebut sebagai "Analisis Dampak Halang Panjat pada Treckshoor untuk Antisipasi Hewan Memanjat di Feeder 5B3 Unit Layanan Pelanggan Painan—Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan Padang". Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan solusi untuk menghentikan gangguan jaringan distribusi yang disebabkan oleh hewan yang memanjat melalui trekshoor, atau penopang tarik, menuju Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM).

Penulis merancang sebuah alat "haling panjat" untuk mencegah hewan seperti monyet, kukang, musang, tupai, ular, dan hewan melata lainnya masuk ke jaringan SUTM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan alat ini mengurangi kemungkinan gangguan hubung singkat yang disebabkan oleh hewan dan juga dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik.

d) Kusuma, dkk. (2022)

Penelitian ini melihat analisis keandalan sistem distribusi pada penyulang Pujon di PT PLN ULP Batu. Penelitian ini terutama memeriksa bagian (bagian jaringan) dengan frekuensi gangguan tertinggi dan melakukan maneuver beban, yang memindahkan sebagian jaringan kepenyulang yang lebih stabil. Hasil analisis menunjukkan bahwa maneuver beban dapat meningkatkan tegangan pada penyulang Pujon dan meningkatkan tingkat keandalan sistem distribusi.

e) PLN (Persero) – Standar SPLN 59:1985 (referensi teoritis tambahan yang digunakan dalam penelitian)

Menjadi acuan dalam menentukan batas keandalan system distribusi listrik, yaitu SAIDI < 12,842 jam / pelanggan / tahun dan SAIFI < 2,415 kali / pelanggan / tahun, yang digunakan sebagai standar evaluasi keandalan jaringan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Jaringan Distribusi Tegangan Menengah

Jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) beroperasi pada level 20 kv dan berfungsi sebagai jembatan antara instalasi pelanggan dan gardu induk. Menurut standar PLN, tegangan menengah yang digunakan biasanya adalah 20 kV. Ini menghubungkan sistem transmisi (tegangan tinggi) dengan sistem distribusi tegangan rendah (220/380 V) yang digunakan langsung oleh konsumen.

1. Tiang listrik, konstruksi penopang yang digunakan untuk menyangga konduktor atau kabel tegangan menengah (20 kV) pada jaringan distribusi listrik Fungsi tiang ini adalah untuk memastikan bahwa konduktor tetap pada ketinggian tertentu dari permukaan tanah, aman dari gangguan lingkungan, teratur, dan sesuai dengan standar. Tiang memiliki berbagai ukuran, mulai dari 9 hingga 12, dan bahkan 14 dAN. Tiang juga terbuat dari kayu, besi, dan beton.



Gambar 2.2 Tiang Beton 12 dAN

2. Isolator tumpu adalah jenis isolator listrik yang dipasang pada tiang listrik. Fungsinya adalah untuk menahan dan menyangga konduktor (kabel penghantar) pada posisi tertentu tanpa bergerak, memberikan isolasi listrik antara konduktor dan tiang. Oleh karena itu, isolator tumpu juga disebut sebagai "penahan" konduktor pada tiang lurus, memastikan konduktor tetap aman secara mekanis maupun listrik.



Gambar 2.2 Isolator Tumpu

3. Isolator Tarik: Ini adalah isolator listrik yang digunakan pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) atau Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) untuk melindungi tiang sudut, tiang ujung, atau tiang penegang dari gaya tarik konduktor. Selain mengisolasi konduktor dari tiang (tanah), isolator tarik juga berfungsi untuk mengurangi beban mekanis yang disebabkan oleh tarikan kawat penghantar agar tidak merusak konstruksi tiang. Akibatnya, isolator tarik disebut sebagai "penguat" jaringan di titik-titik kritis, karena mereka mencegah kawat penghantar menarik langsung ke tiang, menyebabkan kerusakan.



Gambar 2.3 Isolator Tarik

4. Traverse cross arm UNP 10 Traverse cross arm adalah lengan penyangga pada tiang listrik yang digunakan untuk menopang isolator dan konduktor pada jaringan distribusi. Dengan profil baja kanal berbentuk U (U-Channel) ukuran 10 cm (100 mm), UNP 10 Cross Arm Travers adalah lengan tiang listrik yang dipasang melintang pada tiang dan berfungsi sebagaiudukan isolator dan konduktor.



Gambar 2.4 Cross arm travers UNP 10

5. Kawat penghantar yaitu media berupa kawat logam yang digunakan untuk menghantarkan arus listrik dari satu titik ke titik lain. Dalam system tenaga listrik, kawat penghantar berfungsi sebagai jalur utama penyaluran energy listrik.



Gambar 2.5 Kawat Penghantar

6. Fuse Cut Out (FCO) salah satu alat proteksi pada jaringan distribusi tegangan menengah (SUTM – umumnya 20 kV) yang berfungsi sebagai pengaman utama pada Jaringan distribusi terhadap gangguan arus lebih (over current) atau hubung singkat (short circuit).



Gambar 2.6 Fuse Cut Out (FCO)

7. Lightning arrester (penangkal petir) peralatan proteksi pada jaringan listrik yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dari tegangan lebih akibat sambaran petir maupun surja hubung. Alat ini dipasang pada jaringan distribusi atau gardu listrik dan dihubungkan ke tanah (grounding).



Gambar 2.7 Lightning arrester

8. Transformator distribusi (trafo distribusi) sebuah peralatan listrik yang fungsinya meningkatkan tegangan (Step-up) dan menurunkan tegangan (Step-down) listrik dari tingkat yang lebih tinggi pada jaringan distribusi ke tingkat yang lebih rendah dan aman



Gambar 2.8 Transformator Distribusi

9. Recloser peralatan proteksi otomatis pada jaringan distribusi listrik tegangan menengah yang berfungsi sebagai pemutus dan penyambung kembali aliran listrik secara otomatis ketika terjadi gangguan (misalnya hubung singkat atau arus lebih).



Gambar 2.9 Recloser

2.2.1.1 Struktur Sistem Distribusi 20 Kv di Indonesia

Sistem distribusi tenaga listrik 20 kV Indonesia adalah bagian dari sistem tenaga listrik. Ini mengirimkan energi listrik ke pelanggan dari gardu induk melalui jaringan distribusi tegangan menengah. Struktur sistem distribusi ini biasanya dirancang dalam konfigurasi radial karena faktor-faktor seperti kesederhanaan, kemudahan operasional, dan efisiensi biaya investasi dan pemeliharaan. Dalam konfigurasi radial, sumber daya disalurkan ke beban melalui penyulang tanpa adanya jalur suplai alternatif yang permanen.

Gardu Induk, Penyulang, dan Gardu Distribusi berhubungan satu sama lain secara integral. Gardu induk berfungsi sebagai titik transformasi transformator daya untuk mengubah tegangan tinggi, seperti 150 kV atau 70 kV, menjadi tegangan menengah 20 kV. Penyulang-penyulang, juga dikenal sebagai feeder, melayani area tertentu dari 20 kV gardu induk. Jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) atau kabel tanah tegangan menengah (SUTM) yang membentang hingga mencapai gardu distribusi adalah komponen penyulang ini. Gardu distribusi kemudian menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 400/230 V untuk selanjutnya dikirim ke pelanggan tegangan rendah.

Alur penyaluran energi dalam single line diagram (SLD) menunjukkan struktur ini secara konseptual. SLD dimulai dari busbar 20 kV di gardu induk, melewati pemutus tenaga (circuit breaker), kemudian ke penyulang, yang dilengkapi dengan peralatan pengalihan seperti recloser, load break switch (LBS), dan sectionalizer, sebelum akhirnya menuju gardu distribusi. Diagram ini sangat penting karena memberikan gambaran sistem yang lengkap untuk tiap fase dalam satu garis representatif, yang memudahkan analisis gangguan dan manuver jaringan.

Penyulang 20 kV dibagi menjadi beberapa bagian atau bagian dalam praktik operasional. Pembagian bagian dilakukan dengan tujuan untuk membatasi luas area yang akan padam ketika terjadi gangguan. Setiap bagian biasanya dipisahkan oleh peralatan switching seperti LBS atau pengunci. Karena itu, ketika terjadi gangguan, hanya satu bagian yang dipadamkan, sementara bagian lainnya dapat segera dinormalkan kembali melalui manuver jaringan.

Konsep titik normally close (NC) dan normally open (NO) juga diterapkan dalam sistem distribusi. Titik normally close adalah titik pemisah jaringan yang dalam kondisi normal berada pada posisi tertutup sehingga aliran daya mengalir kontinu. Sebaliknya, titik normally open adalah titik yang dalam kondisi normal terbuka dan berfungsi sebagai cadangan suplai dari penyulang lain. Dalam kondisi gangguan atau pemeliharaan, titik NO dapat ditutup untuk melakukan backfeeding sehingga sebagian beban tetap mendapatkan suplai listrik.

Sistem distribusi 20 kV PLN umumnya menggunakan konfigurasi radial dengan pembagian section untuk mempermudah manuver beban dan isolasi gangguan. Setiap penyulang dilengkapi peralatan switching seperti LBS, recloser, dan sectionalizer. Recloser berfungsi memutuskan dan menyambung kembali secara otomatis ketika terjadi gangguan sementara, sedangkan LBS digunakan untuk manuver manual atau semi otomatis dalam kondisi berbeban.

Konsep titik biasanya tertutup (NC) dan biasanya terbuka (NO) juga digunakan dalam sistem distribusi. Dalam kondisi normal, titik normal tertutup adalah titik pemisah jaringan yang tertutup sehingga aliran daya terus mengalir. Sebaliknya, titik normal terbuka adalah titik yang dalam kondisi normal terbuka dan berfungsi sebagai cadangan daya untuk penyulang lain. Dalam situasi gangguan atau pemeliharaan, titik NO dapat ditutup untuk backfeeding, yang memungkinkan sebagian beban tetap menerima pasokan listrik.

Untuk mempermudah manuver beban dan isolasi gangguan, sistem distribusi 20 kV PLN biasanya menggunakan konfigurasi radial dengan pembagian bagian. Setiap penyulang memiliki peralatan switching seperti LBS, recloser, dan sectionalizer. LBS digunakan untuk manuver manual atau semi-otomatis dalam kondisi berbeban, sedangkan recloser berfungsi memutus dan menyambung kembali secara otomatis ketika terjadi gangguan sementara.

2.2.2 Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)

Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) harus dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan agar memberikan perlindungan yang maksimal bagi pekerja. APD tidak hanya berfungsi sebagai pelengkap kerja, tetapi merupakan kebutuhan utama dalam menjaga keselamatan dan kesehatan kerja. Oleh Karena itu, setiap pekerja wajib memahami dan menerapkan prosedur penggunaan APD dengan benar. Adapun prosedur penggunaan APD adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Bahaya Kerja

Pekerja harus memahami potensi bahaya yang terdapat di lingkungan kerja agar dapat menentukan jenis APD yang sesuai.

2. Pemilihan APD yang Tepat

APD yang digunakan harus sesuai dengan jenis pekerjaan, risiko bahaya, serta memenuhi standard keselamatan yang berlaku.

3. Pemeriksaan APD

Sebelum Digunakan Pastikan APD dalam kondisi baik, bersih, dan tidak mengalami kerusakan sebelum digunakan.

4. Penggunaan APD

Sesuai Petunjuk APD harus dipakai dengan benar sesuai dengan fungsi dan petunjuk pemakaian agar dapat melindungi tubuh secara optimal.

5. Perawatan dan Penyimpanan APD

Setelah digunakan, APD harus dibersihkan dan disimpan di tempat yang telah disediakan untuk menjaga kualitas dan daya guna APD.

6. Penggantian APD yang Rusak

APD yang rusak atau tidak layak pakai harus segera diganti untuk menghindari risiko kecelakaan kerja.

Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) menjadi sangat penting dan wajib diterapkan untuk mendapatkan perlindungan yang menyeluruh dan terhindar dari berbagai risiko bahaya dan kecelakaan kerja. APD harus sesuai dengan setiap jenis pekerjaan karena setiap pekerjaan memiliki potensinya sendiri. Oleh karena itu, APD yang tepat tidak hanya melindungi pekerja dari cedera fisik, tetapi juga dapat mencegah masalah kesehatan akibat paparan bahaya dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Oleh karena itu, pemahaman tentang jenis APD dan fungsinya sangat penting untuk menjaga keselamatan dan kesehatan pekerja. Jenis APD yang paling umum digunakan adalah sebagai berikut:

1. Helm

Helm pelindung merupakan salah satu Alat Pelindung Diri (APD) yang wajib digunakan dalam lingkungan kerja yang memiliki potensi bahaya terhadap kepala. Fungsi utama helm pelindung adalah untuk melindungi kepala dari berbagai risiko cedera, terutama akibat benturan dengan benda keras serta benturan atau kejatuhan benda dari ketinggian. Penggunaan helm pelindung yang sesuai standar dapat mengurangi dampak cedera serius dan meminimalkan risiko kecelakaan kerja.



Gambar 2.10 Helm Pelindung

2. Kaca Mata

Kacamata pelindung adalah alat pelindung diri (APD) yang digunakan untuk melindungi mata dari berbagai bahaya yang dapat muncul di tempat kerja. Kacamata pelindung berfungsi untuk mencegah debu, bahan kimia, benda keras, dan cahaya berintensitas tinggi masuk ke mata, yang dapat menyebabkan iritasi atau cedera. Untuk menjaga kesehatan penglihatan pekerja selama melakukan aktivitas kerja, sangat penting untuk menggunakan kacamata pelindung yang sesuai standar.



Gambar 2.11 Kacamata Pelindung

3. Sarung Tangan

Sarung tangan pelindung merupakan APD yang berfungsi untuk melindungi tangan dari risiko cedera akibat kontak langsung dengan benda tajam, panas, bahan kimia, maupun arus listrik. Penggunaan sarung tangan pelindung harus disesuaikan dengan jenis pekerjaan yang dilakukan agar memberikan perlindungan yang maksimal. Dengan menggunakan sarung tangan pelindung, risiko luka, iritasi, serta kecelakaan kerja pada bagian tangan dapat diminimalkan.



Gambar 2.12 Sarung Tangan

4. Sepatu Safety

Sepatu safety merupakan Alat Pelindung Diri yang digunakan untuk melindungi kaki dari potensi bahaya di area kerja. Fungsi sepatu safety adalah untuk melindungi kaki dari benturan benda berat, tertusuk benda tajam, terpeleset, serta risiko lainnya yang dapat menyebabkan cedera. Sepatu safety yang memenuhi standar keselamatan kerja mampu memberikan perlindungan optimal serta kenyamanan bagi pekerja dalam menjalankan aktivitas kerja.



Gambar 2.13 Sepatu Safety

5. Rompi Keselamatan

Rompi keselamatan merupakan APD yang berfungsi untuk meningkatkan visibilitas pekerja, terutama di area kerja yang memiliki lalu lintas kendaraan atau kondisi pencahayaan rendah. Rompi keselamatan biasanya dilengkapi dengan bahan reflektif yang memantulkan cahaya sehingga pekerja dapat terlihat dengan jelas. Penggunaan rompi keselamatan sangat penting untuk mencegah terjadinya kecelakaan akibat kurangnya jarak pandang.



Gambar 2.14 Rompi

6. Full Body Harness

Full Body Harness merupakan Alat Pelindung Diri (APD) yang digunakan untuk melindungi petugas yang bekerja di ketinggian dengan tingkat risiko tinggi. Full body harness berfungsi untuk menopang dan mendistribusikan beban tubuh secara merata keseluruh bagian tubuh sehingga dapat mengurangi dampak cedera apabila terjadi jatuh atau kehilangan keseimbangan. Penggunaan full body harness sangat penting pada pekerjaan pemasangan dan pemeliharaan jaringan listrik, khususnya jaringan tegangan menengah, serta pekerjaan lain yang dilakukan di area ketinggian.



Gambar 2.15 Full Body Harness

2.2.3 Gangguan Jaringan Distribusi

Gangguan pada jaringan distribusi listrik adalah ketika pasokan listrik ke konsumen terganggu oleh gangguan hubung singkat, gangguan tegangan lebih, gangguan sambaran petir, dan kerusakan peralatan seperti tiang, kabel, transformator, dan isolator. Gangguan ini dapat disebabkan oleh faktor alam (binatang, pohon tumbang), faktor manusia (kesalahan instalasi), atau kerusakan material.

Pada jaringan distribusi, gangguan dikategorikan menjadi

1. Gangguan permanen.

Gangguan permanen didefinisikan sebagai gangguan yang tidak dapat diperbaiki dan hanya dapat diperbaiki dengan perbaikan atau penggantian peralatan yang rusak. Sebagai contoh, konduktor putus, isolator pecah, atau tiang roboh. Oleh karena itu, untuk mencegah gangguan permanen, perawatan jaringan, inspeksi rutin, dan pemangkasan pohon sangat penting.

2. Gangguan Sesaat (Temporary Fault)

Gangguan pada jaringan distribusi yang terjadi dalam waktu singkat dan hilang tanpa perbaikan fisik disebut gangguan sesaat. Biasanya, sistem perlindungan (seperti Recloser atau Sectionalizer) akan membuka sebentar lalu menutup kembali untuk memulihkan aliran listrik. Gangguan sesaat ini biasanya disebabkan oleh gangguan dari luar, seperti petir, pohon, atau hewan, dan biasanya dapat diperbaiki secara otomatis.

Penyebab Gangguan Pada SUTM

Faktor-faktor penyebab gangguan pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Tanam Tumbuh

Gangguan, terjadi akibat dahan atau ranting pohon yang menyentuh penghantar SUTM. Hal ini dapat menimbulkan hubung singkat antar fasa atau antara fasa dengan tanah, sehingga menyebabkan pemadaman listrik



Gambar 2.16 Gangguan Pada SUTM Akibat Tanam Tumbuh

2. Gangguan Akibat Hewan

Hewan seperti monyet, tupai, burung, atau kukang sering menjadi penyebab gangguan karena bersentuhan langsung dengan peralatan listrik, seperti arrester, fuse cut out, atau isolator. Kontak ini dapat menyebabkan loncatan arus (flash over) atau hubung singkat.



Gambar 2.17 Gangguan Pada SUTM Akibat Hewan

3. Petir (Surge Lightning)

Sambaran petir dapat mengenai jaringan SUTM secara langsung maupun tidak langsung. Gangguan ini menimbulkan tegangan lebih (over voltage) yang berpotensi merusak peralatan proteksi atau menyebabkan pemutusan aliran listrik.



Gambar 2.18 Gangguan Pada SUTM Akibat Petir (Surge Lightning)

4. Isolator Retak atau Pecah

Isolator yang rusak akibat penuaan, kontaminasi, atau benturan dapat menurunkan daya isolasinya. Hal ini menyebabkan arus bocor dan dapat memicu hubungan singkat pada jaringan.



Gambar 2.19 Gangguan Pada SUTM Akibat Isolator Retak Atau Pecah

5. Konduktor Putus atau Lepas

Terjadi akibat angin kencang, pohon tumbang, atau korosi. Kondisi ini menimbulkan gangguan permanen dan sering memerlukan waktu pemulihan yang lebih lama.



Gambar 2.20 Gangguan Pada SUTM Akibat Konduktor Putus Atau Lepas

6. Kontaminasi dan Kelembapan Udara Tinggi

Debu, garam laut, dan polutan, lain dapat menempel pada isolator, terutama di wilayah pantai atau industri. Ketika bercampur dengan kelembapan, kontaminasi ini dapat menyebabkan flashover dan gangguan sistem.



Gambar 2.21 Gangguan Pada SUTM Akibat Kontaminasi Dan Kelembapan Udara Tinggi

7. Gangguan Mekanis atau Konstruksi

Kesalahan, pemasangan, tiang miring, atau sambungan kabel yang longgar dapat menimbulkan gangguan mekanis, yang pada akhirnya menyebabkan gangguan listrik.



Gambar 2.23 Gangguan Pada SUTM Akibat Mekanis Atau Konstruksi

2.2.4 Jenis Jenis Penghalang Hewan Jaringan Distribusi

1. Protective Sleeve

Selongsong pelindung adalah selongsong pelindung yang dipasang pada kabel atau penghantar listrik dalam jaringan distribusi PLN, terutama pada bagian yang rentan terhadap sentuhan atau gesekan dengan benda lain, seperti hewan, pohon, tiang, atau material bangunan. Selongsong pelindung berbentuk selubung yang terbuat dari plastik berdiameter 0,5 inci dan panjang 1,8 meter.



Gambar 2.10 Protective Sleeve

2. Tutor (Tutup Isolator)

Tutup isolator berfungsi sebagai pelindung yang mencegah kontak langsung antara bagian konduktif isolator dan hewan, benda asing, atau kelembapan udara. Tujuannya adalah untuk mengurangi kemungkinan gangguan listrik seperti short circuit, yang dapat menyebabkan padamnya aliran listrik. Selain itu, pemasangan tutup isolator meningkatkan keandalan sistem distribusi dengan melindungi komponen dari gangguan hewan seperti burung, monyet, atau tupai dan melindunginya dari debu, hujan, dan suhu ekstrim. Oleh karena itu, umur pakai isolator dapat diperpanjang, dan frekuensi perawatan jaringan yang biasa dapat dikurangi.



Gambar 2.11 Tutor (Tutup Isolator)

3. Cover Arrester

Arrester cover digunakan untuk melindungi arrester di trafo distribusi atau jaringan tegangan menengah. Fungsinya adalah untuk mencegah kontak langsung dengan hewan, seperti burung, kera, tupai, dan kukang, serta untuk melindungi komponen arrester dari gangguan dari luar, seperti debu, air, dan benda asing, seperti ranting pohon. Dengan adanya cover arrester, komponen arrester menjadi lebih andal dan terlindungi dari potensi kerusakan yang disebabkan oleh kontaminasi lingkungan, yang dapat mengurangi keandalan dan umur pakai peralatan.



Gambar 2.12 Cover Arrester

4. Cover Fuse Cut Out

Pada gardu distribusi, cover fuse cut out digunakan untuk menutupi FCO agar hewan tidak dapat menyentuhnya secara langsung. Hewan seperti burung, kera, tupai, dan kukang dapat menyebabkan kerusakan pada trafo distribusi atau gangguan jaringan tegangan menengah. Padam lokal seringkali terjadi karena gangguan tersebut, yang mengakibatkan aktivitas bisnis terhambat dan pelayanan pelanggan yang buruk.



Gambar 2.13 Cover Fuse Cut Out

2.2.5 Jenis-Jenis Protective Sleeve

1. Heat-Shrinkable Sleeve (Selongsong Susut Panas)

Heat-shrinkable sleeve merupakan selongsong pelindung berbahan dasar polyolefin yang telah melalui proses *cross-linking* sehingga memiliki sifat menyusut ketika dipanaskan. Pada sistem SUTM, selongsong ini umumnya digunakan untuk melindungi area sambungan konduktor, sambungan jumper, ataupun bagian konduktor yang mengalami kerusakan isolasi ringan. Proses pemasangannya dilakukan dengan memanaskan sleeve menggunakan *heat gun* hingga menyusut dan melekat rapat pada permukaan konduktor atau aksesorinya.

Secara teknis, sleeve jenis ini memiliki rasio penyusutan umumnya 2:1 hingga 3:1, sehingga mampu menyesuaikan diameter kabel sebelum dan sesudah pemanasan. Tegangan kerja untuk aplikasi tegangan menengah biasanya tersedia pada kelas 12 kV hingga 24 kV, sesuai dengan sistem distribusi 20 kV yang banyak digunakan di Indonesia. Ketebalan dinding setelah menyusut berkisar antara 2–4 mm tergantung tipe dan rating tegangan. Beberapa tipe dilengkapi lapisan adhesive (lem panas) di bagian dalam untuk memberikan perlindungan tambahan terhadap kelembapan dan masuknya air. Sleeve ini memiliki ketahanan suhu operasi sekitar -40°C sampai +110°C serta tahan terhadap radiasi ultraviolet.

2. Silicone Rubber Overhead Line Protective Sleeve

Silicone rubber protective sleeve adalah selongsong pelindung berbahan karet silikon yang dirancang khusus untuk dipasang langsung pada konduktor saluran udara tegangan menengah. Berbeda dengan heat-shrink sleeve yang digunakan terutama pada sambungan, jenis ini sering dipasang pada bagian konduktor yang rawan gangguan, seperti di dekat pohon, bangunan, atau persilangan jaringan.

Material karet silikon memiliki sifat elastisitas tinggi, tahan cuaca ekstrem, serta memiliki ketahanan sangat baik terhadap radiasi UV dan ozon. Tegangan operasi sleeve ini umumnya tersedia untuk sistem 12 kV, 20 kV, hingga 24 kV, bahkan pada beberapa produk tersedia untuk tegangan lebih tinggi. Kekuatan dielektriknya dapat mencapai ≥ 20 kV/mm, sehingga cukup untuk memberikan perlindungan tambahan terhadap gangguan luar. Rentang suhu operasi biasanya dari -50°C sampai $+150^{\circ}\text{C}$, dengan tingkat kekerasan sekitar 60–70 Shore A dan elongasi di atas 200%.

Ketebalan dinding sleeve silikon umumnya berada pada rentang 3–6 mm tergantung rating tegangan dan diameter konduktor. Pemasangan dilakukan dengan sistem buka-pasang (split type) atau model tubular elastis yang dapat dibuka dan dijepitkan pada konduktor tanpa perlu pemanasan.

3. Self-Winding atau Braided Cable Sleeve

Self-winding atau braided cable sleeve merupakan selongsong berbentuk anyaman yang umumnya terbuat dari polyethylene (PE), polypropylene (PP), atau serat sintetis lainnya. Pada beberapa aplikasi tertentu digunakan juga serat kaca untuk ketahanan suhu yang lebih tinggi. Sleeve ini bersifat fleksibel dan dapat melilit sendiri di sekitar kabel tanpa perlu perekat atau pemanasan.

Berbeda dari dua jenis sebelumnya yang lebih berfungsi sebagai isolasi listrik utama atau tambahan, braided sleeve lebih difokuskan pada perlindungan mekanis. Dalam jaringan SUTM, sleeve ini biasanya digunakan pada kabel kontrol, kabel aksesoris, atau bagian konduktor yang berpotensi mengalami gesekan dengan tiang, bracket, atau struktur lainnya.

Spesifikasi teknisnya mencakup ketahanan abrasi tinggi, fleksibilitas baik pada suhu -30°C sampai $+100^{\circ}\text{C}$, serta kemampuan ekspansi diameter hingga 1,5 kali ukuran nominalnya. Ketebalan relatif tipis karena tidak dirancang sebagai isolator utama tegangan menengah. Fungsi utamanya adalah memperpanjang umur kabel dengan melindungi dari goresan, getaran, dan tekanan mekanis ringan.

4. Wrap-Around atau Snap-On Insulation Cover

Wrap-around atau snap-on insulation cover adalah selongsong pelindung yang dirancang dengan sistem buka-tutup sehingga dapat dipasang pada konduktor tanpa perlu memutus jaringan. Sleeve ini sangat praktis untuk pekerjaan retrofit atau perlindungan tambahan pada jaringan yang sudah beroperasi.

Material yang digunakan umumnya polyolefin tahan cuaca, PVC khusus outdoor, atau silikon. Tegangan kerja untuk aplikasi SUTM biasanya berada pada kelas 12–24 kV. Ketebalan dinding sekitar 3–5 mm, dengan sifat tahan terhadap UV, kelembapan, dan polusi industri.

Keunggulan utama sleeve jenis ini adalah kemudahan pemasangan di lapangan tanpa alat khusus dan tanpa pemanasan. Sleeve dapat dikunci menggunakan sistem pengait atau klip mekanis. Dalam sistem SUTM, snap-on cover sering digunakan pada titik persilangan, dekat gardu distribusi, atau pada area yang membutuhkan peningkatan jarak aman sementara.

2.2.6 Saluran Udara Tegangan Menengah

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah komponen sistem distribusi yang mengirimkan energi listrik ke gardu distribusi dari gardu induk. Untuk penyaluran ini, konduktor telanjang dipasang di udara dengan dukungan tiang dan isolator. SUTM biasanya beroperasi pada tegangan 20 kV di Indonesia, dan dianggap sebagai opsi konstruksi distribusi yang efisien dan

hemat biaya untuk menyediakan listrik kepada konsumen. Di Indonesia, jaringan distribusi tegangan menengah yang paling umum adalah penghantar telanjang yang ditopang isolator pada tiang atau beton. Jika Anda menggunakan konduktor tanpa isolasi, Anda harus sangat memperhatikan faktor keselamatan, terutama jarak aman yang diperlukan antara penghantar 20 kV dengan antar fasa, bangunan, pepohonan, atau area yang dapat dijangkau oleh orang. Penghantar dengan isolasi setengah, seperti AAAC-S (half insulated single core), dapat digunakan dalam saluran udara tegangan menengah (SUTM). Walaupun jenis penghantar ini belum memenuhi semua persyaratan keselamatan terhadap tegangan sentuh, tujuan penggunaannya adalah untuk mengurangi kemungkinan gangguan sementara, khususnya akibat kontak dengan pepohonan.



Gambar 2.14 Konstruksi SUTM

2.2.6.1 Jarak Aman dan Standar Konstruksi SPLN

Tingkat keandalan sistem dalam sistem Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) sangat dipengaruhi oleh jarak bebas antar konduktor dan lingkungan sekitar. Dalam standar konstruksi, ketentuan SPLN mengatur jarak aman antar fasa, jarak terhadap tanah, dan jarak terhadap pohon dan bangunan.

Jarak bebas antara fasa dan tanah harus cukup untuk mencegah flashover yang disebabkan oleh hewan, polusi, atau kelembapan. Jarak bebas terhadap tanah juga harus ditetapkan agar tidak membahayakan keselamatan masyarakat dan tetap memenuhi batas tegangan sentuh yang aman. Clearance minimal terhadap pohon juga penting karena ranting atau cabang pohon yang terlalu dekat dapat menjadi jalur konduktif saat basah, menyebabkan gangguan satu fasa ke tanah.

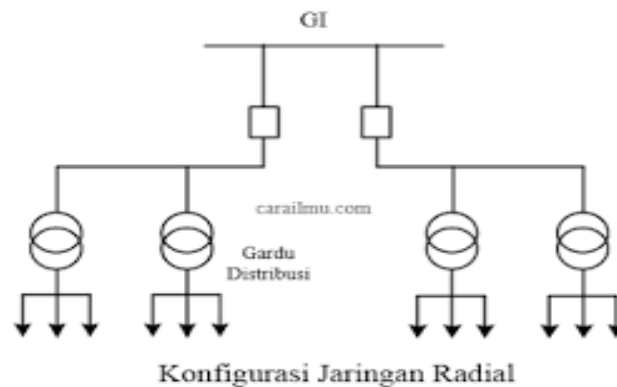
Konduktor AAAC telanjang, yang sering digunakan pada SUTM, memiliki kekuatan mekanis dan kapasitas arus yang lebih tinggi, tetapi tidak memiliki isolasi tambahan. Kondisi ini meningkatkan kemungkinan bridging oleh hewan, terutama di wilayah dengan banyak satwa liar. Dalam situasi di mana hewan menyentuh dua konduktor sekaligus, tubuhnya bertindak sebagai media penghantar, menyebabkan gangguan hubung singkat.

2.2.7 Konfigurasi Jaringan Sistem Tenaga Listrik

Jaringan distribusi primer adalah bagian dari sistem distribusi tenaga listrik yang beroperasi pada tegangan menengah, biasanya 20 kV. Fungsinya sebagai penyulang atau feeder, jaringan ini menyalurkan daya dari sisi sekunder transformator daya di gardu induk ke sisi primer transformator distribusi, yang terpasang pada tiang jaringan. Konfigurasi jaringan distribusi primer umumnya dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu

1. Sistem Radial

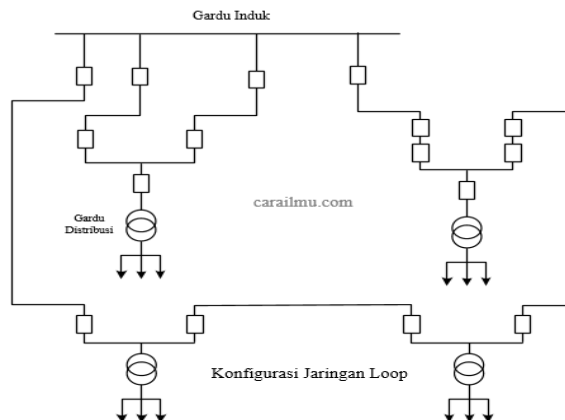
Jaringan distribusi primer yang paling sederhana dan hemat biaya adalah sistem radial. Sistem ini menggunakan satu sumber daya untuk menyuplai sejumlah gardu distribusi secara radial melalui jalur utama. Meskipun memiliki keunggulan dalam hal biaya pembangunan yang rendah dan kemudahan pengoperasian, sistem radial dianggap tidak andal karena seluruh gardu distribusi bergantung pada satu jalur utama. Seluruh beban di bawahnya akan padam jika terjadi gangguan di salah satu titik jaringan utama. Selain itu, penurunan tegangan, atau penurunan tegangan, pada gardu distribusi di ujung penyulang cenderung cukup besar. Akibatnya, kualitas tegangan di lokasi tersebut kurang baik.



Gambar 2.15 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial

2. Konfigurasi Sistem Loop

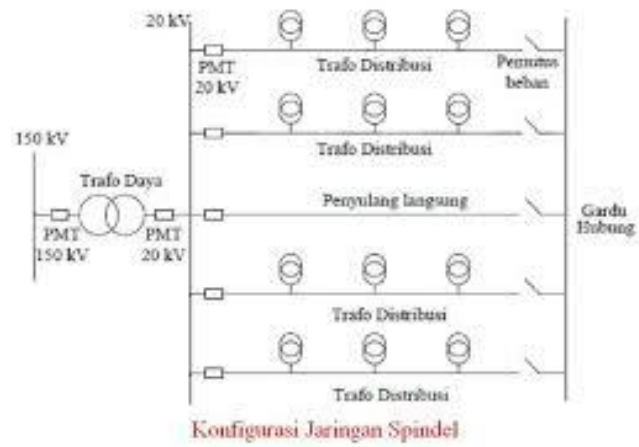
Konfigurasi jaringan distribusi yang dikenal sebagai sistem loop terdiri dari dua sistem radial yang saling terhubung pada ujungnya melalui peralatan switching. Dalam kondisi operasi normal, sistem ini berfungsi seperti sistem radial, tetapi jika terjadi gangguan pada salah satu sisi jaringan, switching dapat diaktifkan untuk mengalihkan pasokan daya melalui jalur lain. Sistem loop memiliki keunggulan utama dalam hal keandalan dibandingkan sistem radial, karena gangguan dapat dilokalisasi tanpa menghilangkan seluruh beban jaringan. Sistem ini memerlukan peralatan tambahan seperti switching otomatis dan sistem proteksi ganda, yang berarti biaya investasi dan pemeliharaan yang lebih besar.



Gambar 2.16 Konfigurasi Jaringan Sistem Loop

3. Konfigurasi Sistem Spindel

Jaringan distribusi berstruktur radial yang dimodifikasi disebut sistem spindle. Pola jaringannya ditandai dengan beberapa kabel yang keluar dari gardu induk menuju satu titik temu, yang disebut gardu hubung. Istilah spindle merujuk pada kelompok penyulang (feeder). Sistem penyulang biasanya terdiri dari setidaknya enam penyulang dalam kondisi berbeban dan satu penyulang cadangan yang beroperasi tanpa beban. Penyulang yang beroperasi membawa beban disebut feeder kerja, dan penyulang yang tidak membawa beban disebut feeder ekspres. Sistem ini memiliki keunggulan dalam mempertahankan kontinuitas penyaluran daya karena, ketika terjadi gangguan pada salah satu penyulang, beban dapat dipindahkan ke penyulang ekspres melalui gardu hubung. Oleh karena itu, sistem spindle menawarkan kombinasi keandalan sistem loop dan efisiensi sistem radial.



Gambar 2.17 Konfigurasi Jaringan Sistem Spindel

2.2.8 Keandalan Sistem Distribusi

Selama lebih dari sepuluh tahun, sistem distribusi kurang memperhatikan keandalan dan pemodelan keandalan dibandingkan dengan sistem pembangkit. Ini karena sistem pembangkit memiliki biaya investasi yang tinggi, dan kegagalan sistem pembangkit dapat memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kehidupan manusia. Beberapa parameter digunakan oleh sistem evaluasi keandalan distribusi, termasuk rata-rata pemadaman (r_s), laju kegagalan rata-rata (λ), dan waktu pemadaman rata-rata (U_s). Parameter-parameter ini sangat penting, tetapi mereka tidak dapat menggambarkan respons sistem secara keseluruhan.

Oleh karena itu, indeks keandalan tambahan diperlukan untuk mengidentifikasi respons dan karakteristik sistem distribusi. Indeks ini juga dapat menunjukkan perilaku sistem dan bagaimana sistem menanggapi gangguan. Penulis hanya menggunakan indeks keandalan sistem yang berorientasi pada pelanggan dalam tugas akhir ini. Indeks keandalan tambahan lainnya yang umum digunakan untuk menilai keandalan sistem distribusi adalah indeks berorientasi pada beban dan energi. Sistem Average Interruption Frequency Index (SAIFI) dan System Average Interruption Duration Index (SAIDI) adalah indeks keandalan yang dimaksud.

1. SAIDI

SAIDI, atau indeks durasi gangguan rata-rata sistem, adalah ukuran yang menunjukkan berapa lama rata-rata pelanggan mengalami pemadaman listrik selama periode tertentu, biasanya satu tahun. Indeks ini membantu memberikan gambaran tentang berapa lama pemadaman rata-rata yang disebabkan oleh gangguan pada bagian-bagian sistem. Dimungkinkan untuk dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$SAIDI = \frac{\text{Jumlah Lama Padam dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$SAIDI = \frac{\Sigma (\text{Lama Padam}) \times (\text{Pelanggan yang Padam})}{\text{Total Pelanggan yang dilayani}} \dots\dots\dots (2.1)$$

2. SAIFI

SAIFI, atau indeks frekuensi gangguan rata-rata sistem, menunjukkan berapa kali rata-rata pelanggan mengalami pemadaman listrik dalam jangka waktu tertentu, biasanya satu tahun. Dimungkinkan untuk dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$SAIFI = \frac{\text{Jumlah Perkalian Frekuensi Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$SAIFI = \frac{\Sigma \text{Jumlah Perkalian Frekuensi Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}} \dots\dots\dots (2.2)$$

3. ENS (Energy Not Supplied)

ENS (Energy Not Supplied), juga dikenal sebagai Energy Not Sold, adalah indeks keandalan sistem distribusi yang menunjukkan jumlah energi listrik yang tidak dapat disalurkan kepada pelanggan karena gangguan pada sistem selama jangka waktu tertentu, biasanya satu tahun. Indeks ini digunakan untuk menggambarkan kerugian energi yang disebabkan oleh terhentinya pasokan energi kepada pelanggan.

Definisi "ENS" mengacu pada akumulasi energi listrik yang hilang selama gangguan atau pemadaman sistem tenaga listrik. Nilai ENS sebanding dengan dampak gangguan terhadap kontinuitas penyaluran energi, yang menunjukkan bahwa tingkat keandalan sistem semakin rendah.

Nilai ENS dapat dihitung dengan menggunakan besarnya arus, tegangan, faktor daya, dan waktu pemadaman. Persamaan berikut menunjukkan perhitungan ENS:

$$ENS = I \times V \times \sqrt{3} \times \cos \phi \times t \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan:

- I = arus beban (A)
- V = tegangan sistem (V)
- $\sqrt{3} = 1,732$
- $\cos \phi$ = factor daya
- t = lama pemadaman (jam)

Hasil perhitungan ENS dinyatakan dalam satuan kilowatt-hour (kWh). Indeks ENS sangat penting dalam evaluasi keandalan system distribusi karena memberikan gambaran dampak gangguan secara langsung terhadap energi yang tidak tersalurkan kepada pelanggan.

2.2.9 Karakteristik Jaringan SUTM 20 kV dengan Konduktor AAAC

Konduktor jenis AAAC, yang berarti konduktor seluruh aluminium, biasanya digunakan dalam jaringan saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV. Salah satu keunggulan konduktor ini adalah bobotnya yang ringan, ketahanan terhadap korosi, dan kekuatan tariknya yang tinggi.

Kelemahan utama konduktor telanjang, bagaimanapun, adalah mereka tidak memiliki lapisan isolasi permanen. Bridging antar fasa atau antara fasa dengan tanah lebih mungkin terjadi di lingkungan dengan populasi hewan yang besar.

Secara elektrik, impedansi sistem dapat digunakan untuk menghitung arus hubung singkat yang dihasilkan oleh bridging. Meskipun sistem pertahanan bekerja sesuai desain, setiap kejadian dicatat sebagai gangguan yang mempengaruhi nilai SAIFI dan SAIDI, sehingga pengurangan kemungkinan gangguan lebih efektif daripada hanya bergantung pada sistem pertahanan aktif.

2.2.10 Mekanisme Gangguan Akibat Hewan pada Jaringan Distribusi

Ketika tubuh hewan berfungsi sebagai media konduktif yang menghubungkan dua titik bertegangan berbeda, gangguan akibat hewan terjadi. Pada sistem 20 kV, flashover dapat terjadi ketika jarak isolasi efektif berkurang karena perbedaan potensial yang tinggi.

Resistansi tubuh hewan terhadap cairan memungkinkan arus mengalir. Sistem perlindungan menghentikan suplai saat terjadi arus gangguan. Baik gangguan sementara maupun jangka panjang masih berdampak pada pelanggan.

Rata-rata kegagalan penyulang akan meningkat jika gangguan seperti ini terjadi berulang kali, yang secara langsung berdampak pada penurunan indeks keandalan sistem.

2.2.11 Konsep Failure Rate dan Mean Time Between Failure (MTBF)

Jumlah kegagalan sistem dalam jangka waktu tertentu disebut gagal tingkat (λ). Nilai gagal tingkat lebih tinggi sebanding dengan keandalan sistem.

Secara matematis, jumlah gangguan = periode waktu/jumlah gangguan.

Penurunan nilai λ yang ditunjukkan oleh penurunan jumlah gangguan akibat hewan setelah pemasangan sleeve perlindungan menunjukkan bahwa Mean Time Between Failure (MTBF) meningkat, yang menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih stabil.

Karena menunjukkan peningkatan kinerja jaringan secara kuantitatif, konsep ini penting untuk evaluasi teknis.

2.2.12 Protective Sleeve sebagai Mitigasi Preventif Berbasis Risiko

Material isolasi berbahan polimer yang disebut lengan perlindungan dipasang pada konduktor telanjang di titik rawan gangguan. Fungsinya adalah untuk meningkatkan jarak isolasi yang efektif dan mencegah kontak langsung antara konduktor dan objek eksternal.

Risiko sistem dapat dihitung dari perspektif perawatan berbasis risiko sebagai berikut: $\text{Risiko} = \text{Kemungkinan} \times \text{Akibat}$

Frekuensi gangguan menunjukkan kemungkinan, sedangkan konsekuensi ditentukan oleh jumlah pelanggan yang terpengaruh dan nilai ENS. Dengan menurunkan kemungkinan gangguan akibat hewan, lengan perlindungan secara langsung menurunkan tingkat risiko sistem distribusi.

Metode ini sejalan dengan gagasan Perbaikan Berpusat Kepercayaan, yang berarti menemukan penyebab utama gangguan dan melakukan tindakan pencegahan yang tepat sasaran.

2.2.13 Hubungan ENS dengan Kerugian Ekonomi

Kerugian energi akibat gangguan ditunjukkan oleh energi tidak tersalur (ENS). Nilai ENS yang tinggi menunjukkan bahwa banyak energi yang tidak disalurkan kepada pelanggan.

Penurunan ENS meningkatkan kontinuitas pelayanan dan menghasilkan lebih banyak uang bagi perusahaan. Akibatnya, analisis ENS merupakan komponen penting dalam menilai efektivitas tindakan teknis pada jaringan distribusi.

2.2.14 Filosofi Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik dirancang untuk menyalurkan energi listrik kepada pelanggan secara konsisten, aman, dan efektif. Sistem distribusi umumnya bersifat radial, yang membuatnya lebih rentan terhadap gangguan. Konfigurasi radial memiliki keunggulan dalam hal kesederhanaan dan biaya investasi yang lebih rendah daripada sistem transmisi yang bersifat interkoneksi dan memiliki redundansi tinggi. Kelemahannya, bagaimanapun, adalah bahwa seluruh pelanggan akan terdampak ketika terjadi gangguan pada satu titik.

Oleh karena itu, keandalan sistem distribusi sangat bergantung pada:

- Kualitas peralatan
- Sistem proteksi
- Strategi pemeliharaan
- Kondisi lingkungan sekitar jaringan

Dalam konteks ini, faktor lingkungan menjadi variabel penting yang tidak dapat dikendalikan sepenuhnya, namun dapat diminimalkan dampaknya melalui strategi mitigasi teknis.

2.2.15 Teori Keandalan Sistem Tenaga Listrik (Reliability Theory)

Dalam teori keandalan sistem tenaga listrik, suatu sistem dianggap andal jika dapat berfungsi tanpa kegagalan dalam jangka waktu tertentu. Pendekatan probabilistik, di mana setiap komponen memiliki kemungkinan gagal tertentu, dapat digunakan untuk menganalisis keandalan sistem distribusi. Probabilitas kegagalan tersebut diwakili dengan tingkat kegagalan (λ), dan waktu perbaikan diwakili dengan waktu perbaikan (r).

Secara umum, indeks keandalan sistem distribusi dapat dibuat sebagai berikut:

$$SAIFI = \sum \lambda_i$$

$$SAIDI = \sum (\lambda_i \times r_i)$$

di mana λ_i adalah failure rate komponen ke- i dan r_i adalah waktu perbaikan komponen tersebut.

Dengan menurunkan λ_i akibat gangguan hewan, maka nilai SAIFI dan SAIDI secara sistematis akan mengalami penurunan.

Pendekatan ini menunjukkan bahwa pengurangan sumber gangguan dominan akan memberikan dampak signifikan terhadap performa keseluruhan sistem.

2.2.16 Analisis Probabilitas Gangguan pada SUTM

Gangguan SUTM dapat diklasifikasikan menjadi gangguan permanen atau temporer. Gangguan yang disebabkan oleh hewan sering kali termasuk gangguan temporer, tetapi masih dicatat sebagai gangguan dalam indeks keandalan.

Di mana kejadian gangguan dianggap acak dan independen dalam suatu periode waktu, distribusi Poisson dapat digunakan untuk menggambarkan frekuensi gangguan secara probabilistic.

Probabilitas terjadinya gangguan dalam periode berikutnya akan secara langsung dikurangi oleh penurunan nilai akibat pemasangan sleeve perlindungan.

Metode ini mendukung analisis bahwa tindakan preventif memiliki basis matematis untuk meningkatkan keandalan sistem.

2.2.17 Koordinasi Proteksi pada Jaringan Distribusi

Perangkat proteksi seperti relay, recloser, sectionalizer, dan fuse cut out termasuk dalam sistem distribusi. Tujuan koordinasi proteksi adalah untuk memastikan bahwa gangguan diputuskan pada titik terdekat dengan lokasi gangguan sehingga area padam seminimal mungkin.

Namun demikian, sistem proteksi bersifat reaktif, yang berarti mereka berfungsi hanya setelah terjadi gangguan. Setiap kerja perlindungan tetap dianggap sebagai kejadian gangguan yang mempengaruhi indeks SAIFI. Oleh karena itu, meskipun sistem perlindungan telah diatur dengan baik, upaya pencegahan tetap diperlukan untuk mengurangi jumlah kejadian gangguan.

Dalam situasi ini, lengan perlindungan berfungsi sebagai penguatan sistem secara pasif sebelum sistem perlindungan aktif dimulai.