

TUGAS AKHIR

IDENTIFIKASI DAN ANALISA *BLACK OUT* AKIBAT JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DI PT PLN UP3 BANDA ACEH

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh :

FITRIA

2107220048



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Fitria

NPM : 2107220048

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : IDENTIFIKASI DAN ANALISA *BLACK OUT* AKIBAT JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DI PT PLN UP3 BANDA ACEH.

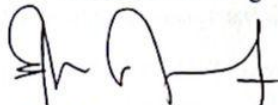
Bidang Ilmu : Analisa Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 1 Agustus 2025

Mengetahui dan menyetujui :

Dosen Pembimbing



Dr. Elvy Sahnur Nasution, ST, M.Pd

Dosen Penguji I



Faisal Irsan Pasaribu, ST, MT

Dosen Penguji II



Dr. Rimbawati, ST, MT

Program Studi Teknik Elektro



Faisal Irsan Pasaribu, ST, MT

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fitria
Tempat/Tanggal Lahir : Pipa Dua, 1 Januari 2003
NPM : 2107220048
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

“IDENTIFIKASI DAN ANALISA *BLACK OUT* AKIBAT JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DI PT PLN UP3 BANDA ACEH”

Bukan merupakan hasil plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan nonmaterial, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis tugas akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh tim fakultas yang di bentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik program studi teknik elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 1 Agustus 2025



Fitria

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, yang telah menetapkan segala sesuatu dengan sempurna, sehingga tiada sehelai daun pun yang jatuh tanpa izin-Nya. Alhamdulillah, atas rahmat dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “IDENTIFIKASI DAN ANALISA *BLACK OUT* AKIBAT JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DI PT PLN UP3 BANDA ACEH” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ayahanda Nasirin, Ibunda Umriah, serta Kakak Ade Tia, dan abang Ady Syahputra yang senantiasa memberikan cinta, dukungan moral, dan materi tanpa henti. Terima kasih atas doa, nasihat, dan kasih sayang yang tiada habisnya.
2. Bapak Prof. Dr .H.Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T, selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T. M.Sc., Ph.D, selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Affandi, S.T., M.T, selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Ibu Dr. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd, selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

8. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd, yang dengan sabar telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan masukan berharga selama proses penyusunan tugas akhir ini.
9. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, atas ilmu yang sangat bermanfaat selama masa perkuliahan.
10. Bapak/Ibu Staf Administrasi Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, atas dukungan administratif yang diberikan.
11. Sahabat penulis Dai Rinaldy, Abdur Rahman Hidayat Tarigan, Aldy Syahputra, Zunaidi, Muhammad Imam Al Hafiz dan Muhammad Rian Fauzan, yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan bantuan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
12. Kepada seseorang yang penulis tidak dapat menyebutkan namanya. Terima kasih telah menjadi penyemangat karena terus memberikan semangat dan dukungan serta bantuan baiknya, menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis, menjadi tempat berkeluh kesah diwaktu lelah, serta menjadi pendengar yang baik. Terima kasih senang tumbuh bersama.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Harapan penulis, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang teknik elektro, dan menjadi kontribusi kecil bagi perkembangan dunia teknik.

Medan,.....

Fitria

ABSTRAK

Jaringan distribusi listrik merupakan komponen vital dalam sistem kelistrikan yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen akhir secara andal dan berkesinambungan. Namun, kenyataannya, gangguan pada jaringan distribusi masih kerap terjadi dan seringkali mengakibatkan blackout yang merugikan baik pelanggan maupun pihak penyedia listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi serta menganalisis penyebab utama blackout yang disebabkan oleh gangguan jaringan distribusi di PT PLN UP3 Banda Aceh dengan menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA). Metode FTA dipilih karena mampu menggambarkan hubungan logis antar komponen penyebab kegagalan melalui diagram pohon kesalahan, sehingga dapat diketahui akar masalah secara sistematis dan menyeluruh. Data yang digunakan diperoleh melalui observasi langsung di lapangan (data primer) serta dokumentasi dan laporan resmi dari perusahaan (data sekunder). Berdasarkan analisis ditemukan lima kejadian dasar yang berkontribusi terhadap terjadinya gangguan pada jaringan distribusi listrik, yaitu gangguan akibat faktor alam, gangguan oleh hewan, aktivitas manusia, kesalahan dalam pemasangan instalasi, serta kerusakan pada komponen listrik. Analisis keandalan juga dilakukan dengan menghitung indeks SAIDI dan SAIFI. Nilai SAIDI yang diperoleh sebesar 0,0878 jam/pelanggan/tahun dan SAIFI sebesar 0,346 kali/pelanggan/tahun menunjukkan bahwa tingkat keandalan sistem distribusi listrik di Banda Aceh masih berada di bawah standar yang ditetapkan SPLN, sehingga dinyatakan baik. Dengan identifikasi akar penyebab melalui FTA, diharapkan PT PLN UP3 Banda Aceh dapat menyusun langkah prioritas perbaikan yang lebih tepat sasaran, meningkatkan keandalan jaringan distribusi, serta meminimalkan risiko blackout di masa mendatang.

Kata Kunci: Fault Tree Analysis, Blackout, Jaringan distribusi listrik, Keandalan sistem, PT PLN UP3 Banda Aceh

ABSTRACT

The electrical distribution network is a vital component of the power system that functions to deliver electricity from substations to end consumers reliably and continuously. However, in reality, disturbances in distribution networks still frequently occur and often result in blackouts that are detrimental to both customers and electricity providers. This study aims to identify and analyze the main causes of blackouts due to distribution network disturbances at PT PLN UP3 Banda Aceh using the Fault Tree Analysis (FTA) method. FTA was chosen because it can systematically and comprehensively illustrate the logical relationships between failure-causing components through a fault tree diagram, thus identifying the root causes effectively. The data used in this research were obtained through direct field observations (primary data) as well as official company documents and reports (secondary data). Based on the analysis, five basic events were found to contribute to disturbances in the distribution network, namely disturbances caused by natural factors, animal interference, human activities, installation errors, and component failures. Reliability analysis was also carried out by calculating the SAIDI and SAIFI indices. The obtained SAIDI value of 0.0878 hours/customer/year and SAIFI value of 0.346 interruptions/customer/year indicate that the reliability level of the distribution system in Banda Aceh is still below the standard set by SPLN, thus considered good. By identifying the root causes through FTA, it is expected that PT PLN UP3 Banda Aceh can determine more targeted improvement priorities, enhance the reliability of the distribution network, and minimize blackout risks in the future.

Keywords : Fault Tree Analysis, blackout, distribution network, system reliability, PT PLN UP3 Banda Aceh

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Ruang Lingkup	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan	4
2.2 Sistem Tenaga Listrik	6
2.2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik	7
2.3 Standar Keandalan dan Kualitas Pasokan Listrik	8
2.4 Jaringan Distribusi Tenaga Listrik	11
2.4.1 Konfigurasi Jaringan Distribusi	12
2.4.2 Struktur Distribusi Tenaga Listrik.....	21
2.4.3 Penyebab Gangguan Pada Jaringan Distribusi.....	24
2.4.4 Dampak Gangguan pada Jaringan Distribusi Listrik	26
2.5 Metode <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA)	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1 Waktu dan Tempat	35
3.2 Bahan dan Alat	35
3.3 Prosedur Penelitian.....	36
3.4 Pengumpulan Data	36
3.5 Analisa Data	39
3.6 Alur Penelitian	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Analisis Indeks Keandalan SAIDI dan SAIFI	43
4.1.1 Perhitungan SAIDI SAIFI perbulan.....	43
4.1.2 Analisa SAIDI SAIFI Pertahun.....	45

4.1.3 Analisa Tingkat Keandalan SAIFI, SAIDI terhadap SPLN	49
4.2 <i>Energy Not Supplied</i> (ENS)	51
4.3 Membuat <i>Fault Tree Analysis</i>	55
4.3.1 Pengumpulan Data	55
4.3.2 Identifikasi Penyebab dan Akibat Gangguan Jaringan Listrik.....	57
4.3.3 Membuat <i>Fault Tree Analysis</i>	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Nilai indeks kehandalan SPLN 68-2 : 1986	11
Tabel 2. 2 Standar Nilai indeks kehandalan IEEE std 1366 – 2003	11
Tabel 2. 3 Standar Nilai indeks kehandalan WCS) dan WCC.....	11
Tabel 2. 4 Simbol Gate	31
Tabel 2. 5 Hubungan dua kejadian dengan logika AND	32
Tabel 2. 6 Hubungan dua kejadian dengan kejadian OR.....	33
Tabel 2. 7 Kejadian (Even)	33
Tabel 3. 1 Data Kelistrikan Kota Banda Aceh.....	37
Tabel 3. 2 Riwayat Pemadaman Bulan Januari 2022	38
Tabel 4. 1 Data Riwayat Pemadaman	43
Tabel 4. 2 Nilai SAIDI.....	45
Tabel 4. 3 Nilai SAIFI	46
Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai SAIFI dan SAIDI.....	48
Tabel 4. 5 Perbandingan nilai indeks keandalan SAIDI, SAIFI, dan standar SPLN..	50
Tabel 4. 6 Data ENS	52
Tabel 4. 7 Klasifikasi Risiko Operasional Berdasarkan ENS.....	54
Tabel 4. 8 Data Gangguan Jaringan Distribusi Listrik Tahun 2022	56
Tabel 4. 9 Data Penyebab dan Akibat Gangguan Jaringan Listrik.....	57
Tabel 4. 10 Deskripsi Huruf dan angka fault tree.....	62
Tabel 4. 11 Faktor Penyebab dan Dampak Ditimbulkan Gangguan Jaringan.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2. 2 Jaringan Tegangan Menengah.....	12
Gambar 2. 3 Jaringan Distribusi Konfigurasi Radial	14
Gambar 2. 4 Jaringan Distibusi Konfigurasi Loop	14
Gambar 2. 5 Jaringan Distribusi Konfigurasi Gird	15
Gambar 2. 6 Jaringan Distribusi Konfigurasi Spindel	16
Gambar 2. 7 Transformator.....	17
Gambar 2. 8 Recloser	18
Gambar 2. 9 Penyulang	24
Gambar 3. 1 PLN UP3 Banda Aceh	35
Gambar 4. 1 Perbandingan jumlah pelanggan dan jumlah jam pelanggan	44
Gambar 4. 2 Perhitungan SAIDI Menggunakan Excel	46
Gambar 4. 3 Perhitungan SAIFI Menggunakan Excel.....	48
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan SAIDI dan SAIFI	49
Gambar 4. 5 Grafik perbandingan keandalan SAIDI ,SAIFI dan standar SPLN...	51
Gambar 4. 6 Grafik ENS.....	53
Gambar 4. 7 Gangguan Jaringan Distribusi Listrik Tahun 2022	57
Gambar 4. 8 Penyebab Terjadinya Gangguan Jaringan Distribusi Listrik.....	60
Gambar 4. 9 Hasil Fault Tree dari Gangguan Jaringan Distribusi Listrik	61

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan distribusi listrik memegang peranan penting dalam penyediaan energi listrik kepada masyarakat. Di Indonesia, PT PLN (Persero) sebagai penyedia utama listrik memiliki tanggung jawab besar untuk memastikan keandalan dan kesinambungan pasokan listrik. Jaringan distribusi, yang berinteraksi langsung dengan konsumen, sangat rentan terhadap gangguan yang dapat memengaruhi kehidupan sehari-hari.

Terdapat tiga faktor yang mempengaruhi adanya gangguan yaitu gangguan internal, gangguan eksternal dan faktor manusia, faktor gangguan internal terjadi disebabkan oleh gangguan hubung singkat, kerusakan alat, switching, kegagalan pada isolasi, dan kerusakan pada pembangkit, faktor gangguan eksternal terjadi disebabkan oleh luar sistem, misalkan angin kencang yang menyebabkan kabel putus, sambaran petir, ranting pohon, dan lain sebagainya, dan yang terakhir yaitu gangguan yang disebabkan oleh manusia, hal ini bisa terjadi dikarenakan kelalaian atau kecerobohan operator, karena tidak taat peraturan yang sudah ditetapkan. Dari faktor gangguan di atas membuat penyaluran distribusi listrik akan mengalami pemadaman (Makruf et al., 2022).

Pemadaman listrik dapat menyebabkan kerugian bagi pelanggan rumah tangga maupun pelaku usaha kecil dan menengah, seperti usaha percetakan dan laundry. Bagi industri kecil dan menengah, pemadaman listrik berdampak pada meningkatnya biaya produksi barang. Perhitungan kerugian ini didasarkan pada harga pokok produksi yang harus dikeluarkan untuk menghasilkan barang jadi. Akibatnya, pelaku usaha harus mengeluarkan biaya tambahan, seperti membeli genset dan bahan bakar selama pemadaman terjadi, yang pada akhirnya dapat mengurangi pendapatan mereka.

Gangguan jaringan akibat pemadaman listrik memberikan dampak bagi PLN, khususnya UP3 Banda Aceh, berupa hilangnya peluang penjualan tenaga listrik dan penurunan citra perusahaan. Bagi masyarakat, dampaknya meliputi pemadaman listrik serta risiko kerusakan pada peralatan elektronik. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini menggunakan metode Fault Tree Analysis

(FTA) yaitu metode analisis deduktif dengan menggambarkan grafik enumerasi dan analisis bagaimana suatu kerusakan bisa terjadi dan berapa peluang terjadinya kerusakan. FTA lebih difokuskan pada kerusakan yang memiliki tingkat kepentingan pada level paling tinggi (undesired top level event). FTA menunjukkan hubungan logika (logical connections) antara kerusakan dengan kesalahan-kesalahan yang terjadi pada sistem dengan menggunakan simbol Boolean (Nugroho, 2017). Dengan mengidentifikasi akar penyebab masalah, diharapkan dapat meminimalkan terulangnya gangguan serupa di masa mendatang serta memberikan rekomendasi perbaikan yang efektif untuk mengurangi gangguan pada transmisi listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana tingkat keandalan sistem jaringan distribusi PT. PLN UP3 Banda Aceh apakah sudah memenuhi standar SPLN ?
2. Bagaimana penyebab gangguan jaringan dan resiko operasional pada jalur distribusi listrik di PT PLN UP3 Banda Aceh ?

1.3 Ruang Lingkup

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa batasan yang perlu diperjelas, yaitu:

1. Menganalisis tingkat keandalan sistem jaringan distribusi PT PLN UP3 Banda Aceh.
2. Penelitian ini mencakup analisis penyebab utama terjadinya gangguan pada sistem jaringan distribusi listrik di PT PLN UP3 Banda Aceh. Analisis dilakukan untuk memahami faktor-faktor teknis dan non-teknis yang memengaruhi keandalan jaringan distribusi listrik. Penelitian ini akan mengidentifikasi dan mengklasifikasikan jenis-jenis gangguan yang terjadi pada sistem jaringan distribusi.
3. Penelitian ini menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA) untuk mengidentifikasi akar penyebab gangguan jaringan serta untuk menentukan prioritas perbaikan yang perlu dilakukan.
4. Penelitian ini terbatas pada wilayah operasional PT PLN UP3 Banda

Aceh, dengan fokus pada penyebab utama terjadinya gangguan pada sistem jaringan distribusi listrik.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi penyebab utama gangguan jaringan distribusi listrik untuk menganalisis faktor-faktor teknis dan non-teknis yang menjadi penyebab utama gangguan pada sistem jaringan distribusi listrik di PT PLN UP3 Banda Aceh.
2. Menentukan Prioritas Perbaikan Menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA) Untuk menentukan prioritas langkah perbaikan berdasarkan identifikasi akar penyebab gangguan, sehingga dapat meningkatkan keandalan jaringan distribusi listrik dan meminimalkan risiko gangguan di masa mendatang.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan panduan untuk mengidentifikasi dan menangani penyebab utama gangguan jaringan distribusi listrik secara lebih efektif, serta menetapkan prioritas perbaikan yang dapat meningkatkan keandalan sistem.
2. Dengan mengurangi gangguan jaringan distribusi listrik, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas layanan listrik kepada masyarakat, meminimalkan kerugian yang dialami pelanggan, dan mendukung kegiatan ekonomi yang lebih stabil.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Keberhasilan kinerja suatu sistem atau bagian dari jaringan listrik memiliki peran yang sangat penting. Untuk mengevaluasi keandalan sistem, perlu dilakukan analisis efisiensi kinerja sistem selama periode waktu tertentu.

Hasil penelitian dari (Wasahua et al., 2021) Analisa Penyebab Gangguan Jaringan Distribusi GI Sirimau Area Ambon Menggunakan Metode FTA (*Fault Tree Analysis*) untuk mengidentifikasi Minimal Cut Set, yaitu kumpulan kejadian dasar (*Basic Event*) yang menjadi penyebab utama kerusakan pada jaringan distribusi listrik. Analisis ini mengungkapkan beberapa faktor utama yang menyebabkan gangguan pada sistem distribusi listrik. Salah satu penyebab utama kerusakan adalah gangguan alam. Faktor-faktor seperti angin kencang, petir, banjir, dan hujan deras sering kali memicu kerusakan jaringan listrik. Akibatnya, berbagai komponen seperti kabel, tiang listrik, penangkal petir, dan konektor menjadi rusak atau tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Selain itu, aktivitas manusia juga menjadi penyebab signifikan dalam kerusakan jaringan distribusi listrik. Aktivitas seperti bermain layang-layang atau pekerjaan yang dilakukan oleh pihak ketiga sering kali menimbulkan gangguan, misalnya benda tersangkut atau jatuh di atas kabel listrik. Hal ini menghambat aliran listrik dan mengganggu proses distribusi daya. Gangguan juga dapat terjadi akibat mutu komponen atau material listrik yang kurang baik. Penggunaan material berkualitas rendah atau komponen yang sudah usang meningkatkan risiko kerusakan pada jaringan. Komponen tersebut mudah keropos, patah, atau aus, sehingga mempercepat kegagalan sistem distribusi. Kesalahan instalasi juga menjadi penyebab lainnya. Ketidaksesuaian pemasangan dengan prosedur yang telah ditetapkan, atau pemasangan komponen yang tidak terikat dengan kuat, membuat jaringan distribusi listrik lebih rentan terhadap kerusakan. Kombinasi dari berbagai faktor ini menunjukkan pentingnya analisis mendalam untuk memastikan keandalan jaringan distribusi listrik.

Selain itu, penelitian oleh (Duyo, 2020) mengenai analisis penyebab gangguan jaringan pada distribusi listrik di PLN (Persero) Rayon Daya Makassar menggunakan metode *Fault Tree Analysis*. Hasil penelitian menunjukkan adanya

selisih yang signifikan antara energi listrik yang dikirimkan dari gardu induk dengan energi listrik yang diterima oleh pelanggan. Selisih ini disebabkan oleh berbagai gangguan, di antaranya: gangguan pada komponen JTM (I1) sebanyak 55 kejadian (12,5%), gangguan pada peralatan JTM (I2) sebanyak 30 kejadian (6,7%), gangguan pada transformator (I3) sebanyak 8 kejadian (1,8%), gangguan akibat faktor alam (I4) sebanyak 1 kejadian (0,2%), gangguan eksternal (E1) sebanyak 15 kejadian (3%), gangguan akibat bencana alam (E2) sebanyak 61 kejadian (13,7%), gangguan akibat pekerjaan pihak lain atau binatang (E3) sebanyak 15 kejadian (0,33%), serta gangguan yang disebabkan layang-layang, umbul-umbul, atau kesalahan instalasi jaringan distribusi listrik (E4) sebanyak 258 kejadian (58,2%). Berdasarkan analisis gangguan pada jaringan distribusi listrik di UPJ Rayon Daya Makassar menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA), diketahui bahwa gangguan utama disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti bermain layang-layang, pemasangan umbul-umbul, serta penggalian saluran PDAM. Dari data yang dicatat selama periode Mei 2016 hingga Januari 2017, tercatat total 308 gangguan yang terjadi.

Pada penelitian (Intang & Pamoga, 2023) mengenai Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kv Pada Gardu Induk Sungai Juaro. Penelitian dilakukan di Gardu Induk Sungai Juaro Palembang yang memiliki delapan penyulang, yaitu Penyulang Kelingi, Kikim, Enim, Belabak, Rawas, Lematang, Komering, dan Ogan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai SAIFI untuk seluruh penyulang memenuhi standar SPLN 68-2:1986. Selain itu, nilai SAIFI pada Penyulang Kelingi, Enim, Rawas, Lematang, dan Komering sesuai dengan standar IEEE Std 1366TM-2003, sedangkan Penyulang Kikim, Belabak, dan Ogan tidak memenuhi standar tersebut. Untuk nilai SAIDI, seluruh penyulang memenuhi standar SPLN 68-2:1986. Namun, hanya Penyulang Enim dan Rawas yang memenuhi standar IEEE Std 1366TM-2003, sementara Penyulang Kelingi, Kikim, Belabak, Lematang, Komering, dan Ogan tidak memenuhi standar ini. Adapun nilai CAIDI, hanya Penyulang Kikim yang sesuai dengan standar IEEE Std 1366TM-2003, sedangkan Penyulang lainnya, yaitu Kelingi, Enim, Belabak, Rawas, Lematang, Komering, dan Ogan, tidak memenuhi standar tersebut. Sementara itu, nilai ASAI untuk seluruh penyulang berada dalam kategori baik, dengan kemampuan penyulang

menyediakan atau menyuplai sistem sepanjang tahun 2021 melebihi 99,999%. Nilai ASUI juga menunjukkan hasil yang baik, dengan ketidakmampuan penyulang menyuplai sistem selama tahun 2021 kurang dari 0,001%.

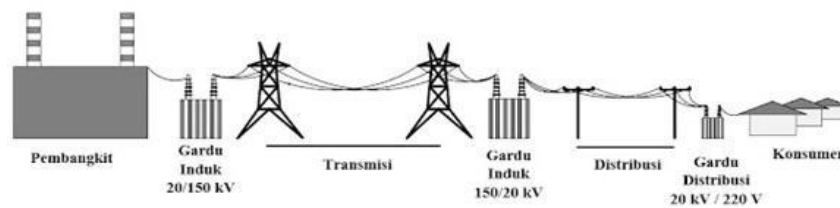
Kemudian pada penelitian (Hermawan & Masri, 2023) analisi pemasangan trafo terhadap analisa jatuh tegangan di penyulang Lamhotma. Agar sistem distribusi tetap andal di masa mendatang, beban pada setiap transformator tidak boleh melebihi 80% dari kapasitas maksimumnya. Namun, situasi kelebihan beban (overload) tetap dapat terjadi, seperti yang dialami oleh salah satu transformator di Penyulang Lamhotma. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah menambahkan transformator sisipan guna menekan persentase pembebanan dan mencegah kerugian lebih lanjut. Hal serupa juga diterapkan pada transformator BL.33 di Penyulang Lamhotma, di mana dilakukan berbagai perhitungan, pengamatan, dan penelitian, baik secara manual maupun dengan bantuan aplikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum pemasangan transformator sisipan, beban transformator BL.33 mencapai 90%. Setelah pemasangan transformator sisipan, beban puncak berhasil dikurangi sebesar 26%, menjadi hanya 64%. Proses penyisipan transformator ini juga didukung oleh simulasi menggunakan aplikasi untuk menentukan jarak ideal penempatan transformator, sehingga efisiensi sistem distribusi dapat dioptimalkan.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri atas tiga komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Tahap pembangkitan adalah proses di mana energi listrik dihasilkan melalui berbagai jenis pembangkit listrik. Jenis pembangkit ini mencakup Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), yang memanfaatkan energi kinetik air, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang menggunakan bahan bakar seperti batu bara atau minyak untuk menghasilkan uap, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), yang mengandalkan energi panas dari dalam bumi, Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), yang menggunakan gas sebagai bahan bakar utama, serta Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), yang memanfaatkan reaksi fisi nuklir sebagai sumber energi.

Energi listrik yang dihasilkan dari pembangkit tersebut kemudian disalurkan

kepada konsumen melalui sistem transmisi dan distribusi. Jaringan transmisi berfungsi untuk menyalurkan listrik dalam tegangan tinggi atau ekstra tinggi dari pembangkit ke gardu induk, biasanya menggunakan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) atau kabel bawah tanah tegangan tinggi (KTTT). Setelah itu, energi listrik diteruskan melalui sistem distribusi, yang menurunkan tegangan listrik ke tingkat yang sesuai untuk kebutuhan konsumen, seperti rumah tangga, komersial, atau industri (Muhammad Aminudin & Sutarno, 2017).



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

2.2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik adalah jaringan yang berfungsi untuk mengangkut energi listrik dari pembangkit listrik ke pusat-pusat konsumsi, seperti substation dan area distribusi. Sistem ini dirancang untuk mentransfer listrik dalam jarak jauh dengan efisiensi tinggi, sehingga mengurangi kehilangan energi selama proses pengiriman. Saluran transmisi digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit menuju pusat beban melalui jaringan tegangan tinggi, seperti saluran tegangan tinggi (150 kV) atau saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (500 kV). Tegangan listrik tersebut kemudian diturunkan menjadi tegangan subtransmisi sebesar 70 kV menggunakan transformator penurun tegangan. Selanjutnya, di gardu induk, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan distribusi primer sebesar 20 kV. Di gardu distribusi yang tersebar di sekitar pusat beban, transformator distribusi mengubah tegangan tersebut menjadi tegangan rendah sebesar 220/380 V untuk disalurkan kepada konsumen akhir (Sujatmiko, 2009).

Sistem transmisi terdiri dari jaringan saluran udara (overhead lines) dan kabel bawah tanah yang menghubungkan pembangkit listrik dengan substation. Saluran udara sering digunakan karena biaya yang lebih rendah, sementara kabel bawah tanah lebih umum di daerah perkotaan untuk mengurangi dampak visual dan risiko

gangguan.

2.3 Standar Keandalan dan Kualitas Pasokan Listrik

Standar nilai indeks SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) merupakan indikator utama dalam mengukur tingkat keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Indikator ini dinyatakan dalam bentuk probabilitas yang memberikan gambaran seberapa sering dan seberapa lama gangguan terjadi pada jaringan distribusi. Berbagai indeks keandalan telah dikembangkan untuk menyediakan kerangka evaluasi yang terstandarisasi guna menilai performa keandalan jaringan distribusi listrik (Dalimunte et al., 2023).

SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) adalah salah satu indikator utama yang digunakan untuk mengukur keandalan sistem distribusi listrik. Indeks ini dihitung dengan mengalikan total durasi pemadaman listrik (dalam jam) dengan jumlah pelanggan yang terdampak, kemudian membaginya dengan total jumlah pelanggan yang dilayani oleh sistem tersebut. SAIDI memberikan gambaran tentang rata-rata durasi pemadaman listrik yang dialami oleh setiap pelanggan selama periode tertentu akibat gangguan pada sistem distribusi. Dengan menggunakan indeks ini, penyedia layanan listrik dapat mengevaluasi performa jaringan distribusi, khususnya dalam hal durasi dan dampak pemadaman yang terjadi pada pelanggan (Dalimunte et al., 2023).

Indeks SAIDI sangat penting untuk memahami sejauh mana gangguan pada jaringan memengaruhi pelanggan, baik secara individu maupun keseluruhan. Informasi ini dapat menjadi dasar bagi perusahaan listrik untuk melakukan perbaikan, seperti peningkatan infrastruktur, penerapan teknologi monitoring yang lebih canggih, atau perencanaan pemeliharaan yang lebih efektif. Dengan begitu, durasi pemadaman dapat diminimalkan, sehingga kualitas layanan dan kepuasan pelanggan meningkat.

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Durasi pemadaman pada konsumen})}{\text{Total pelanggan}} \dots\dots\dots (2.1)$$

atau

$$SAIDI = \frac{\sum V_i.M_i}{\sum M_i} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

V_i = Lama/durasi pemadaman pasokan listrik tahunan rata-rata
(hours/year)

M_i = Total pelanggan

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) adalah salah satu indikator yang digunakan untuk mengukur keandalan sistem distribusi listrik. Indeks ini dihitung dengan membagi total jumlah gangguan pada sebuah penyulang, yang dikalikan dengan jumlah pelanggan terdampak, dengan total jumlah pelanggan yang dilayani dalam sistem tersebut. Hasil perhitungan SAIFI dinyatakan dalam satuan "pemadaman per pelanggan," yang menunjukkan rata-rata frekuensi gangguan yang dialami oleh setiap pelanggan dalam periode tertentu. Perhitungan SAIFI dapat dilakukan untuk berbagai rentang waktu, seperti harian, bulanan, hingga tahunan, tergantung pada kebutuhan analisis keandalan. Indeks ini memberikan gambaran tentang seberapa sering pelanggan mengalami gangguan pemadaman listrik. Oleh karena itu, SAIFI menjadi salah satu tolok ukur penting bagi penyedia listrik, seperti PT PLN, untuk menilai kualitas layanan mereka dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik (Hidayat et al., 2022).

Dengan memahami nilai SAIFI, perusahaan dapat mengidentifikasi titik-titik kritis dalam jaringan distribusi dan mengambil langkah perbaikan yang diperlukan, seperti pemeliharaan preventif, penggantian peralatan yang usang, atau peningkatan infrastruktur, untuk meminimalkan frekuensi gangguan dan meningkatkan kepuasan pelanggan.

$$SAIFI = \frac{\text{Jumlah pelanggan padam}}{\text{total pelanggan}} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

λ_i = durasi pemadaman rata rata pertahun

N_i = jumlah konsumen padam

N = total pelanggan

Indeks Keandalan Ekonomis adalah metode yang digunakan untuk menilai pencapaian penghematan biaya atau efisiensi biaya dalam suatu sistem. Evaluasi dilakukan terhadap produk yang dihasilkan, serta proses dan layanan yang diterapkan. Selain mempertimbangkan aspek pemeliharaan, metode ini juga memperhitungkan faktor biaya yang terlibat. Persamaan untuk menghitung daya yang diambil pada saat gangguan dapat dirumuskan, yaitu:

1. Daya Aktif

Daya aktif adalah energi utama yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi bentuk energi lain seperti gerakan, panas, atau cahaya. Satuan untuk daya aktif adalah watt (W), dan daya ini mengalir ke beban tanpa ada umpan balik kembali ke sumber. Daya aktif dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{Daya Aktif} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\theta \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

V = Tegangan (V)

I = Kuat Arus (A)

Cos θ = 0,8 (rata-rata faktor daya masing-masing penyulang)

2. *Energy Not Supplied* (ENS)

Energy Not Supplied (ENS) adalah jumlah energi yang seharusnya disalurkan kepada pelanggan tetapi tidak tercapai akibat gangguan atau pemadaman pada jaringan. Pengurangan ENS berarti mengurangi frekuensi dan durasi gangguan pada pasokan daya sistem. Rumus untuk menghitung ENS dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{ENS} = \sum \text{Gangguan (kW)} \times \text{Durasi (jam)} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

ENS = Energi yang tak tersalurkan (kWh)

$\sum \text{Gangguan}$ = Jumlah daya aktif yang mengalami gangguan (kW)

Durasi = Lamanya terjadi gangguan (jam).

SPLN (Standar Perusahaan Listrik Negara) adalah standar internal PT PLN (Persero) yang ditetapkan oleh Direksi dan bersifat wajib untuk diikuti. Standar ini mencakup berbagai dokumen teknis, seperti peraturan, pedoman, prosedur pengujian, dan spesifikasi teknis yang dirancang untuk menetapkan tingkat keandalan yang diharapkan dari sistem distribusi tenaga listrik. Sejak tahun 1976 telah diselesaikan lebih dari 262 standar, meliputi 59 standar di sektor pembangkitan, 68 standar di sektor transmisi, 99 standar di sektor distribusi, 6 standar di sektor SCADA dan 30 standar di sektor umum (Dalimunte et al., 2023).

1. Standar Nilai indeks keandalan SPLN 68-2 : 1986

Tabel 2. 1 Standar Nilai indeks keandalan SPLN 68-2 : 1986

Standar Indeks Keandalan	Standar Nilai	Satuan
SAIDI	21,09	Jam/pelanggan/tahun
SAIFI	3,2	Kali/pelanggan/tahun

2. Standar Nilai indeks keandalan IEEE std 1366 – 2003

Tabel 2. 2 Standar Nilai indeks keandalan IEEE std 1366 – 2003

Indikator Kerja	Standar nilai	Satuan
SAIDI	2,3	Jam/pelanggan/tahun
SAIFI	1,45	Jam/pelanggan/tahun

3. Standar Nilai indeks keandalan WCS (*World Class Service*) dan WCC (*World Class Company*)

Tabel 2. 3 Standar Nilai indeks keandalan WCS dan WCC

Indikator Kerja	Standar nilai	Satuan
SAIDI	1,67	Jam/pelanggan/tahun
SAIFI	3	Kali/pelanggan/tahun

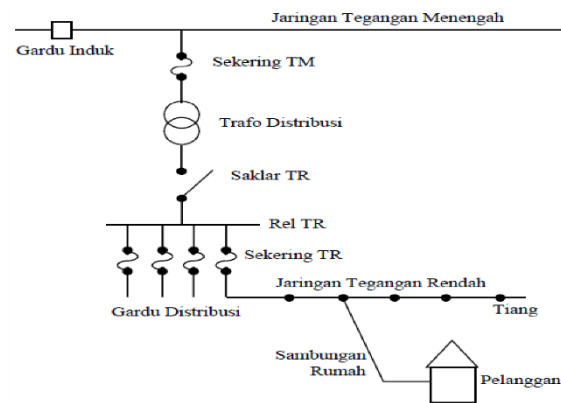
Tujuan utama dari penerapan standar ini adalah:

1. Menentukan tingkat keandalan sistem distribusi sebagai indikator kinerja layanan listrik.
2. Menjadi alat evaluasi terhadap capaian keandalan saat ini dan dasar untuk merencanakan perbaikan ke depan.
3. Memberikan tolak ukur untuk membandingkan tingkat keandalan dengan standar nasional dan internasional.

2.4 Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan komponen krusial dalam sistem tenaga listrik yang memiliki peran utama dalam mendistribusikan energi listrik dari gardu induk ke pengguna akhir. Fungsi utama dari jaringan ini adalah untuk

menurunkan tegangan dari tingkat transmisi yang tinggi menjadi tingkat yang lebih rendah, sehingga dapat digunakan dengan aman oleh konsumen, baik di sektor rumah tangga maupun industri (Kunang & Zuhriyadi, 2017).



Gambar 2. 2 Jaringan Tegangan Menengah

Jaringan distribusi tidak hanya terdiri dari saluran distribusi, tetapi juga mencakup berbagai elemen penting lainnya, seperti transformator distribusi yang berfungsi untuk mengubah tegangan, serta perangkat perlindungan yang dirancang untuk menjaga keamanan dan keandalan pasokan listrik. Selain itu, jaringan ini juga dilengkapi dengan sistem pengendalian dan pemantauan yang memungkinkan operator untuk mengawasi kondisi jaringan secara real-time, mendeteksi gangguan, dan melakukan pemeliharaan yang diperlukan. Dengan demikian, jaringan distribusi berperan penting dalam memastikan bahwa energi listrik dapat disalurkan secara efisien dan andal kepada semua pengguna, mendukung berbagai aktivitas ekonomi dan sosial dalam masyarakat (Vaswani & Kusuma, 2022). Dalam suatu sistem kelistrikan, gangguan kerap terjadi dan dapat menyebabkan terputusnya aliran listrik bahkan kerusakan pada peralatan listrik. Gangguan tersebut dapat muncul pada berbagai bagian, salah satunya pada jaringan distribusi listrik. Faktor penyebab gangguan meliputi gangguan hewan, sambaran petir, hingga kesalahan pengaturan sistem proteksi. Kondisi ini tentu akan berdampak terhadap tingkat keandalan sistem penyaluran tenaga listrik. (Pasaribu et al., 2021)

2.4.1 Konfigurasi Jaringan Distribusi

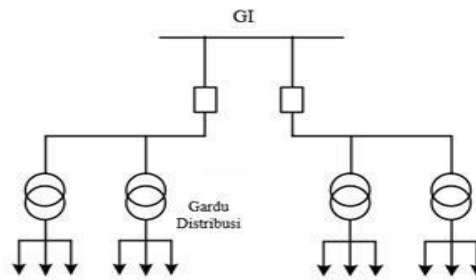
Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan komponen vital dalam sistem

kelistrikan yang dibagi menjadi dua bagian utama yaitu jaringan distribusi primer dan sekunder. Jaringan distribusi primer memiliki peran penting dalam menyalurkan listrik dari gardu induk ke berbagai titik distribusi yang tersebar di wilayah tertentu. Biasanya, jaringan ini beroperasi pada tegangan menengah, yang memungkinkan efisiensi dalam pengiriman energi listrik dalam jarak yang lebih jauh tanpa kehilangan daya yang signifikan. Sedangkan jaringan distribusi sekunder bertugas untuk mendistribusikan listrik dari titik distribusi ke konsumen akhir, yang mencakup rumah tangga, bisnis, dan industri. Jaringan ini beroperasi pada tegangan rendah, sehingga aman untuk digunakan oleh konsumen. Proses ini memastikan bahwa energi listrik yang diterima oleh konsumen berada pada tingkat yang sesuai untuk berbagai aplikasi, mulai dari penerangan rumah hingga pengoperasian mesin industri (Kadir, A., & Rahman, M. 2021).

Konfigurasi jaringan distribusi primer memiliki peran krusial dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan. Berdasarkan jenis konfigurasinya, jaringan distribusi primer dapat diklasifikasikan menjadi empat tipe utama. Setiap jenis konfigurasi dirancang untuk memenuhi kebutuhan spesifik dalam sistem distribusi listrik, dengan mempertimbangkan faktor seperti keandalan, efisiensi, dan fleksibilitas operasional (Wasahua et al., 2021).

1. Jaringan Distribusi Konfigurasi Radial

Konfigurasi ini dirancang untuk melayani aliran daya dalam satu arah, dari sumber energi menuju beban. Sistem ini biasanya diterapkan pada area dengan kepadatan pelanggan yang rendah, seperti kawasan pedesaan atau daerah terpencil. Sederhana dalam desain dan mudah diimplementasikan, konfigurasi radial memiliki keunggulan dalam hal biaya instalasi yang lebih rendah. Namun, kelemahan utamanya adalah tingkat keandalan yang terbatas. Jika terjadi gangguan di satu titik, seluruh pelanggan yang terhubung pada jalur tersebut akan mengalami pemadaman. Oleh karena itu, sistem ini lebih cocok digunakan pada wilayah yang tidak memerlukan pasokan energi listrik dengan tingkat keandalan tinggi.

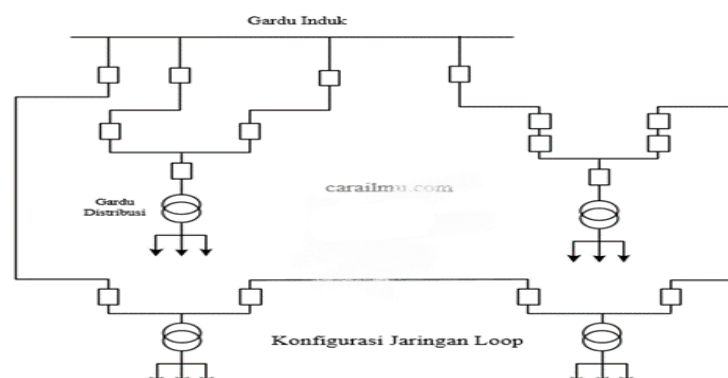


Gambar 2. 3 Jaringan Distribusi Konfigurasi Radial

2. Jaringan Distibusi Konfigurasi Loop

Konfigurasi ini memiliki karakteristik aliran daya yang berbentuk sirkular, dimulai dari rel sumber, mengalir ke beban, dan kembali lagi ke rel sumber. Desain ini memungkinkan adanya jalur cadangan (*backup*) jika terjadi gangguan pada salah satu bagian aliran. Dengan sistem ini, suplai daya tetap dapat berlanjut melalui jalur alternatif, sehingga meminimalkan risiko pemadaman total.

Konfigurasi loop umumnya digunakan untuk pelanggan yang membutuhkan pasokan listrik dengan tingkat kontinuitas tinggi, seperti fasilitas kesehatan, pusat data, atau area industri. Selain meningkatkan keandalan, konfigurasi ini juga memberikan fleksibilitas operasional dalam melakukan pemeliharaan jaringan tanpa harus memutus seluruh aliran daya. Meskipun demikian, implementasi sistem ini memerlukan investasi yang lebih besar karena kompleksitas desain dan instalasi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi radial.

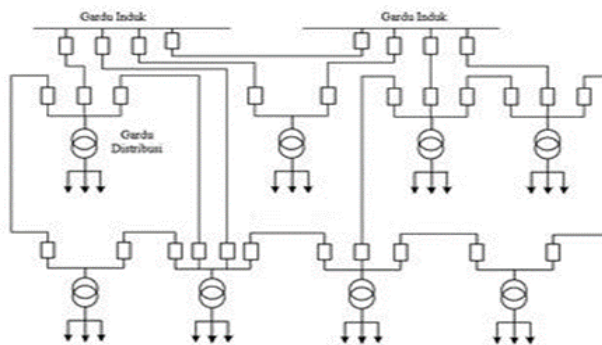


Gambar 2. 4 Jaringan Distibusi Konfigurasi Loop

3. Jaringan Distribusi Konfigurasi Gird

Konfigurasi grid merupakan pengembangan dari sistem jaringan loop dengan jumlah aliran daya yang lebih banyak dan terintegrasi. Dalam sistem ini, setiap jalur distribusi saling terhubung, menciptakan jaringan yang kompleks dan fleksibel. Keunggulan utama konfigurasi grid adalah kemampuannya untuk menyediakan banyak jalur cadangan (backup) ketika terjadi gangguan pada salah satu aliran daya. Dengan demikian, pasokan listrik ke pelanggan tetap terjaga tanpa gangguan signifikan.

Sistem ini sangat cocok untuk area dengan tingkat kepadatan pelanggan yang tinggi, seperti pusat kota, kawasan komersial, atau zona industri. Selain memastikan kontinuitas daya, konfigurasi grid juga memberikan tingkat keandalan yang sangat tinggi, menjadikannya pilihan ideal untuk fasilitas yang tidak mentoleransi pemadaman listrik, seperti rumah sakit, bandara, dan jaringan transportasi. Implementasi konfigurasi grid membutuhkan investasi awal yang besar, baik dari segi perencanaan, pembangunan infrastruktur, maupun pengelolaan operasionalnya. Meskipun demikian, keuntungannya dalam meningkatkan keandalan dan fleksibilitas jaringan membuatnya menjadi solusi unggulan untuk mendukung kebutuhan energi di wilayah dengan permintaan tinggi.



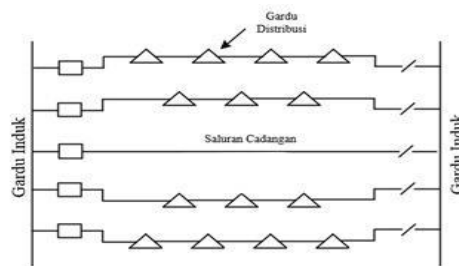
Gambar 2. 5 Jaringan Distribusi Konfigurasi Gird

4. Jaringan Distribusi Konfigurasi Spindel

Konfigurasi spindel melibatkan beberapa saluran distribusi yang keluar dari Gardu Induk (GI) dan mengarah ke suatu titik penghubung yang dikenal sebagai Gardu Hubung (GH). Hubungan antara GI dan GH ini

diintegrasikan melalui satu saluran utama yang disebut *express feeder*.

Desain ini dirancang untuk menangani kebutuhan pasokan listrik dalam jumlah besar, sehingga sangat ideal digunakan di kawasan perkotaan dengan konsentrasi pelanggan yang tinggi, seperti kawasan bisnis, gedung perkantoran, dan permukiman padat penduduk. Dengan memusatkan distribusi energi melalui GH, konfigurasi ini memungkinkan pengelolaan jaringan yang lebih terstruktur, mendukung fleksibilitas, dan mempercepat perbaikan jika terjadi gangguan. Selain itu, *express feeder* berfungsi sebagai jalur utama untuk memastikan aliran listrik yang efisien dan andal ke pelanggan, sehingga mengurangi risiko pemadaman pada area yang memerlukan pasokan listrik berkesinambungan. Meskipun efisien, sistem ini membutuhkan perencanaan dan investasi infrastruktur yang lebih besar dibandingkan konfigurasi lainnya.



Gambar 2. 6 Jaringan Distribusi Konfigurasi Spindel

Terdapat beberapa peralatan utama yang berfungsi untuk memastikan kelancaran dan keamanan pasokan listrik yaitu:

1. Transformator

Transformator adalah unit distribusi yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari sumber ke pengguna dengan cara meningkatkan atau menurunkan tegangan yang mengalir dalam jaringan transmisi. Tujuan dari peningkatan tegangan yang disalurkan adalah untuk mengurangi jumlah rugi daya listrik yang terjadi, di mana rugi daya tersebut berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir dalam jaringan. Agar sistem distribusi tetap dapat diandalkan di masa depan, maka persentase pembebanan pada setiap transformator tidak boleh melebihi kapasitas maksimalnya, yaitu 80 (Hermawan & Masri, 2023).

Transformator juga merupakan salah satu komponen utama dalam sistem kelistrikan yang berperan penting dalam menyalurkan energi listrik kepada konsumen. Penyaluran energi listrik dilakukan melalui sistem tenaga listrik yang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Mengingat jarak antara pembangkit dan beban yang umumnya cukup jauh, diperlukan transformator daya untuk menaikkan dan menurunkan tegangan, sehingga kerugian energi selama proses penyaluran dapat diminimalkan. Namun, dalam pengoperasiannya, transformator sering mengalami gangguan yang dapat mengganggu kinerjanya. Oleh karena itu, diperlukan sistem proteksi dan pengamanan yang andal serta pengaturan yang stabil guna memastikan kelancaran operasi sistem secara keseluruhan (Elvy et al., 2015).



Gambar 2. 7 Transformator

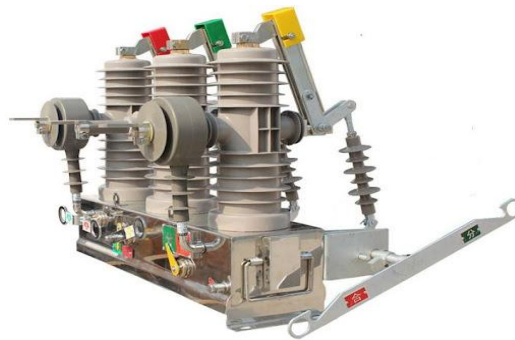
Berdasarkan standar SPLN, transformator di Indonesia dirancang untuk beroperasi pada suhu maksimum 40°C , dengan rata-rata suhu harian sekitar 30°C dan rata-rata suhu tahunan sebesar 30°C . Menurut *International Electrotechnical Commission* (IEC), transformator memiliki umur pakai hingga 20 tahun atau setara 7.300 hari jika dioperasikan pada beban penuh (100% kapasitas) dalam suhu lingkungan 20°C . Dalam situasi ini, tingkat penurunan umur transformator secara normal diperkirakan sebesar 0,0137% per hari.

Gangguan pada transformator (trafo) umumnya terjadi akibat berbagai faktor teknis maupun operasional. Salah satu penyebab utama adalah kerusakan pada komponen internal trafo, seperti kerusakan isolasi pada lilitan, bushing yang retak atau bocor, serta kegagalan fungsi sistem pendingin yang mengakibatkan peningkatan suhu secara berlebihan. Selain faktor internal, gangguan eksternal seperti beban berlebih (*overload*), sambaran petir, serta kondisi lingkungan

ekstrem seperti kelembapan tinggi dan pencemaran udara juga berperan besar dalam mempercepat kerusakan trafo. Jika tidak ditangani dengan cepat, gangguan-gangguan ini dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem distribusi dan bahkan berujung pada pemadaman listrik yang luas. Oleh karena itu, pemantauan kondisi trafo secara berkala dan penerapan sistem proteksi yang andal menjadi hal yang sangat penting untuk menjaga keandalan dan kontinuitas pasokan listrik (Desember et al., 2013).

2. Recloser

Recloser adalah salah satu perangkat yang digunakan dalam sistem pengamanan jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV untuk menganalisis adanya gangguan yang bersifat sementara maupun gangguan yang bersifat permanen (Yolnasdi, 2020).



Gambar 2. 8 Recloser

Recloser berfungsi sebagai perangkat untuk memutus dan menghubungkan bagian jaringan listrik yang mengalami gangguan. Alat pengaman ini bekerja secara otomatis dan memiliki kemampuan untuk menutup kembali kontak hingga tiga kali. Jika gangguan masih terjadi setelah itu, recloser akan membuka secara permanen (*lock out*). Proses switching pada recloser berlangsung dengan cepat, yang menyebabkan terjadinya kondisi peralihan (*transien*) menuju keadaan stabil (*steady state*). Dalam kondisi ini, terjadi perubahan pada tegangan, arus, dan frekuensi dibandingkan dengan keadaan normal, yang dapat mengganggu peralatan listrik yang digunakan oleh konsumen. Meskipun demikian, recloser sangat bermanfaat dalam mengurangi durasi pemadaman listrik. Dengan mengoptimalkan penempatan recloser

dalam jaringan distribusi, indeks keandalan sistem tenaga listrik dapat ditingkatkan.

3. Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan Tegangan Menengah (JTM) merupakan salah satu bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik, yang berperan untuk mengalirkan listrik dari gardu induk ke gardu distribusi dengan tegangan berkisar antara 1 kV hingga 35 kV. Di Indonesia, tegangan yang paling umum digunakan adalah 20 kV. Keberadaan JTM sangat vital karena menjadi penghubung antara jaringan tegangan tinggi dan jaringan tegangan rendah, sehingga listrik dapat disalurkan dengan aman dan efisien ke konsumen akhir. Salah satu komponen utama dalam JTM adalah :

1. *Load Break Switch (LBS)*

Load Break Switch (LBS) berfungsi untuk menyambung dan memutuskan arus beban pada jaringan distribusi, khususnya saat dilakukan pengalihan beban atau pemeliharaan tanpa harus mematikan seluruh sistem. Namun, gangguan pada LBS kerap terjadi akibat beberapa faktor, seperti ausnya kontak yang dapat menyebabkan kegagalan pemutusan arus, korosi atau karat pada bagian logam yang menurunkan efektivitas konduksi, serta kesalahan operasional yang berisiko merusak mekanisme internal perangkat.

2. Tiang listrik

Tiang listrik juga memegang peranan penting dalam menopang struktur JTM. Tiang ini berfungsi sebagai penyangga konduktor, isolator, serta peralatan proteksi lainnya agar tetap kokoh dan terjaga kestabilannya. Meskipun demikian, tiang listrik bisa mengalami kerusakan struktural akibat korosi pada tiang baja atau keropos pada tiang beton. Gangguan lainnya dapat disebabkan oleh pergeseran tanah, banjir, hingga kecelakaan lalu lintas yang menyebabkan tiang tumbang. Tiang yang dipasang tidak sesuai standar juga berisiko miring atau menanggung beban yang tidak seimbang.

3. Kabel listrik

Kabel listrik dalam jaringan tegangan menengah bertugas menyalurkan arus dari satu titik ke titik lainnya. Kabel ini rawan mengalami gangguan apabila terdapat kerusakan pada isolasinya, yang dapat menyebabkan korsleting. Ancaman lain datang dari pencurian kabel, yang tidak hanya merugikan dari sisi material, tetapi juga dapat menyebabkan pemadaman listrik secara luas. Di sisi lain, kondisi cuaca ekstrem seperti petir atau angin kencang juga berpotensi merusak sambungan kabel atau membakar isolasinya (Hutauruk et al., 2024).

4. Isolator

Isolator berfungsi untuk menjaga konduktor listrik agar tidak bersentuhan langsung dengan struktur penyangga seperti tiang, sehingga mencegah terjadinya kebocoran arus atau hubungan pendek. Gangguan pada isolator biasanya timbul akibat akumulasi debu, polusi, dan kotoran, yang menurunkan kemampuan isolasinya dan bisa menyebabkan loncatan listrik (*flashover*). Isolator juga rentan rusak secara fisik karena benturan atau kondisi cuaca buruk. Selain itu, kelembaban tinggi dan hujan asam dapat mempercepat degradasi bahan isolator, menurunkan efektivitasnya dalam mengisolasi tegangan (Anugerah et al., 2021).

4. Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) merupakan bagian akhir dari sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi menuju konsumen dengan tegangan standar 220/380 volt. Sistem ini menjadi jalur terakhir sebelum listrik digunakan oleh pelanggan secara langsung. Namun, dalam operasionalnya, JTR rentan mengalami gangguan teknis yang dapat mengganggu kontinuitas penyaluran listrik.

Beberapa komponen utama yang kerap menjadi sumber gangguan antara lain adalah relay, konektor, dan jumper tegangan (Tahalele & Yesaya, 2024). Relay, sebagai perangkat proteksi sistem, memiliki peran penting dalam mendeteksi gangguan dan memutus aliran listrik saat terjadi kondisi tidak normal. Namun, jika relay tidak dikalibrasi dengan benar atau

mengalami kerusakan internal—yang termasuk dalam kategori gangguan komponen—maka alat ini tidak akan mampu merespons dengan cepat dan tepat. Akibatnya, gangguan pada jaringan tidak dapat diisolasi dengan segera, yang dapat memperluas area dampak dan membahayakan peralatan lainnya. Setelah itu Konektor, yang berfungsi sebagai penghubung antar komponen jaringan, juga bisa menjadi sumber gangguan. Kesalahan instalasi seperti pengencangan yang kurang baik, pemasangan pada kondisi lembab, atau pemilihan konektor yang tidak sesuai spesifikasi dapat menimbulkan loncatan listrik (bunga api), menyebabkan pemanasan berlebih, hingga menimbulkan hubung singkat (korsleting). Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat merusak isolasi penghantar dan memicu kerusakan pada fase lainnya. Dan yang terakhir Jumper tegangan, yang digunakan untuk menyambungkan antar fasa atau antar jaringan, bila digunakan secara tidak tepat atau tidak sesuai standar teknik kelistrikan, dapat menjadi sumber gangguan serius. Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak stabil atau tidak seimbang. Selain itu, gangguan alam seperti hujan deras, sambaran petir, angin kencang, hingga pohon tumbang yang mengenai jaringan juga kerap menyebabkan jumper mengalami gangguan fisik, sehingga memperbesar potensi gangguan distribusi (Deri, 2023).

2.4.2 Struktur Distribusi Tenaga Listrik

a. Gardu Induk

Gardu induk merupakan fasilitas yang berisi ujung-ujung saluran transmisi atau subtransmisi, transformator, peralatan proteksi, kontrol, dan titik awal saluran distribusi. Gardu induk berperan dalam menyuplai tenaga listrik ke jaringan distribusi dengan tegangan suplai berupa tegangan menengah. Fungsi utama gardu induk meliputi: (i) mentransformasikan tenaga listrik dari satu tegangan tinggi ke tegangan tinggi lainnya, atau dari tegangan tinggi ke tegangan menengah, serta (ii) melakukan pengukuran, pengawasan operasi, pengaturan, dan pengamanan sistem tenaga listrik (Latupeirissa, 2018).

Gardu induk merupakan komponen krusial dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berperan penting dalam menjaga kontinuitas dan keandalan pasokan

daya. Di dalam gardu induk terdapat berbagai perangkat utama, di antaranya saklar pemisah (*Disconnecting Switch/PMS*) dan saklar pemutus tenaga (*Circuit Breaker/PMT*). Kedua perangkat ini memiliki fungsi berbeda namun saling melengkapi dalam pengoperasian sistem tenaga.

Saklar pemisah (PMS) berfungsi sebagai alat untuk menunjukkan secara visual bahwa suatu peralatan telah benar-benar terlepas dari tegangan. Perangkat ini tidak dirancang untuk digunakan dalam kondisi berbeban atau saat terjadi gangguan. Dengan kata lain, operasinya hanya dilakukan dalam kondisi tanpa arus. Meski demikian, saklar pemisah rentan mengalami gangguan yang umumnya disebabkan oleh beberapa faktor. Kesalahan dalam proses instalasi, seperti pemasangan komponen yang tidak tepat, dapat menghambat fungsi mekanis perangkat. Selain itu, kondisi lingkungan seperti kelembaban tinggi dapat menurunkan performa isolasi dan bahkan menyebabkan korosi pada bagian logam. Fenomena ini pernah ditemukan dalam studi kasus di Gardu Induk Secang, di mana kelembaban memengaruhi nilai hambatan isolasi antar fase. Faktor lain yang turut berperan adalah keberadaan debu, kotoran, dan serangga yang dapat mengganggu mekanisme pengoperasian saklar, terutama jika gardu induk tidak dibersihkan secara berkala (Varian & Sulisty, 2024).

Sementara itu, saklar pemutus tenaga atau PMT memiliki fungsi yang lebih aktif dalam sistem proteksi. Perangkat ini digunakan untuk memutuskan aliran listrik secara otomatis saat terjadi gangguan atau beban berlebih, guna melindungi sistem dari kerusakan yang lebih besar. Salah satu penyebab umum kerusakan PMT adalah kegagalan tripping coil, yaitu komponen yang bertanggung jawab dalam memberikan gaya mekanis untuk membuka kontak saklar. Kegagalan jenis ini pernah terjadi di Gardu Induk Kebon Jeruk, yang menyebabkan PMT tidak dapat beroperasi sesuai fungsinya. Selain itu, kondisi kontak yang kotor atau aus dapat meningkatkan hambatan, menyebabkan rugi daya dan pemanasan berlebih, sebagaimana dilaporkan pada Gardu Induk 150 kV Jajar. Kesalahan instalasi juga menjadi penyebab lain yang patut diperhatikan, karena pemasangan yang kurang tepat dapat mengganggu kerja sistem secara keseluruhan (Kusumo, 2023).

Meski demikian, penting untuk dicatat bahwa perawatan rutin dapat secara signifikan mengurangi risiko gangguan. Sebagai contoh, uji hambatan isolasi yang

dilakukan di Gardu Induk Secang menunjukkan bahwa PMT dalam kondisi baik, meskipun terdapat perbedaan nilai hambatan antar fase. Hal ini menegaskan bahwa inspeksi dan pemeliharaan berkala memainkan peran penting dalam menjaga performa komponen utama di gardu induk.

b. Gardu Hubung (*Switch Substation*)

Gardu hubung adalah gardu yang berfungsi menghubungkan gardu induk dengan gardu transformator distribusi. Gardu ini tidak dilengkapi transformator, melainkan hanya peralatan hubung-bagi (*switchgear*) dan biasanya dilengkapi dengan rel-rel (*busbars*). Terdapat dua jenis gardu hubung, yaitu gardu hubung spindel yang mampu menangani hingga 7 unit penyulang, serta gardu hubung non-spindel yang memiliki 3 unit penyulang (Latupeirissa, 2018).

c. Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah gardu yang dilengkapi dengan transformator distribusi dan berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan primer dan jaringan sekunder. Pada gardu ini, tegangan menengah (TM) diubah menjadi tegangan rendah (TR) untuk didistribusikan lebih lanjut.

d. Penyulang (*Feeder*)

Penyulang (*Feeder*) adalah komponen utama dalam sistem distribusi listrik yang berfungsi sebagai jalur penghubung untuk mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk ke konsumen akhir. Penyulang memiliki peran penting dalam memastikan kontinuitas dan keandalan pasokan listrik ke berbagai lokasi, sehingga kualitas layanan kelistrikan tetap terjaga. Namun, dalam praktiknya, penyulang sering menghadapi berbagai gangguan yang dapat mempengaruhi fungsinya. Gangguan ini biasanya muncul akibat kejadian acak dalam sistem distribusi, seperti:

1. Gangguan Fungsi Peralatan

Kerusakan atau kegagalan operasi pada komponen penyulang, seperti kabel, trafo, atau switchgear, yang dapat mengakibatkan gangguan pasokan listrik.

2. Peningkatan Beban

Kenaikan konsumsi listrik yang signifikan, terutama pada waktu puncak, dapat menyebabkan penyulang bekerja di luar kapasitas normalnya dan memicu gangguan.

atau lebih konduktor yang seharusnya terpisah. Hal ini dapat disebabkan oleh kerusakan pada isolasi kabel, yang mungkin terjadi akibat keausan, korosi, atau faktor lingkungan. Ketika korsleting terjadi, arus listrik dapat mengalir dengan sangat tinggi, yang berpotensi menyebabkan lonjakan arus yang berbahaya. Lonjakan ini tidak hanya dapat merusak peralatan listrik, seperti transformator dan pemutus sirkuit, tetapi juga dapat menimbulkan risiko kebakaran yang serius.

2. Kegagalan pada komponen penting dalam jaringan distribusi, seperti transformator, pemutus sirkuit, atau saklar, dapat menyebabkan gangguan yang signifikan. Kerusakan ini sering kali disebabkan oleh keausan akibat penggunaan yang berkepanjangan, cacat pabrik, atau kondisi operasional yang tidak sesuai dengan spesifikasi teknis. Ketika peralatan gagal berfungsi, pasokan listrik kepada konsumen dapat terganggu, yang dapat mengakibatkan pemadaman listrik yang berkepanjangan.
3. Overload terjadi ketika total beban yang terhubung ke jaringan distribusi melebihi kapasitas yang dapat ditangani oleh sistem. Situasi ini sering kali muncul saat permintaan listrik meningkat secara tiba-tiba, misalnya, pada saat cuaca ekstrem atau saat banyak konsumen menggunakan peralatan listrik secara bersamaan. Overload dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada kabel dan peralatan, yang berpotensi merusak infrastruktur dan mengakibatkan pemadaman listrik.
4. Kerusakan pada isolasi kabel dapat menyebabkan arus bocor, yang dapat mengakibatkan gangguan operasional dan kerusakan pada peralatan listrik. Arus bocor ini tidak hanya mengurangi efisiensi sistem, tetapi juga dapat menimbulkan risiko keselamatan, seperti kebakaran atau sengatan listrik. Oleh karena itu, pemeliharaan rutin dan pemeriksaan isolasi sangat penting untuk mencegah gangguan ini.
5. Fluktuasi tegangan adalah perubahan mendadak dalam tingkat tegangan yang dapat merusak peralatan listrik dan menyebabkan gangguan operasional. Fluktuasi ini dapat disebabkan oleh perubahan beban yang cepat, seperti saat peralatan besar dinyalakan atau dimatikan, atau masalah pada sumber daya, seperti gangguan pada pembangkit listrik. Perubahan

tegangan yang tidak stabil dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan sensitif, seperti komputer dan perangkat elektronik lainnya.

Gangguan eksternal adalah masalah yang berasal dari faktor-faktor di luar sistem distribusi listrik itu sendiri. Beberapa penyebab utama gangguan eksternal ini meliputi (Sugiana et al., 2020) :

1. Sambaran petir dapat menyebabkan lonjakan tegangan yang sangat tinggi, yang dapat merusak peralatan listrik dan infrastruktur jaringan distribusi. Untuk mengurangi risiko ini, sistem perlindungan petir, seperti penangkal petir, sering dipasang pada infrastruktur listrik.
2. Pohon yang tumbang akibat angin kencang atau kondisi cuaca buruk dapat merusak saluran distribusi. Ketika pohon atau cabang jatuh pada kabel listrik, hal ini dapat menyebabkan hubung singkat dan pemadaman listrik yang signifikan. Pemangkasan pohon secara rutin di sekitar saluran listrik dapat membantu mengurangi risiko ini.
3. Cuaca Ekstrem seperti badai, salju, atau angin kencang dapat merusak infrastruktur jaringan distribusi, seperti tiang listrik dan kabel. Cuaca ekstrem tidak hanya dapat menyebabkan kerusakan fisik, tetapi juga dapat mengganggu proses pemeliharaan dan perbaikan, sehingga memperpanjang waktu pemadaman.
4. Kecelakaan Kendaraan yang melibatkan kendaraan yang menabrak tiang listrik atau infrastruktur jaringan distribusi dapat menyebabkan kerusakan fisik yang serius. Kecelakaan ini sering kali memerlukan waktu yang lama untuk diperbaiki, sehingga mengganggu pasokan listrik kepada konsumen.
5. Aktivitas Manusia seperti kegiatan konstruksi, penggalian, atau aktivitas lain yang tidak hati-hati dapat merusak kabel bawah tanah atau infrastruktur jaringan distribusi lainnya. Oleh karena itu, penting untuk melakukan koordinasi yang baik antara pihak-pihak yang terlibat dalam proyek konstruksi.

2.4.4 Dampak Gangguan pada Jaringan Distribusi Listrik

Gangguan pada jaringan distribusi listrik dapat memiliki berbagai dampak yang signifikan, baik bagi penyedia layanan listrik maupun bagi konsumen. Gangguan ini dapat muncul akibat berbagai faktor, seperti hubungan arus pendek,

kerusakan peralatan, atau masalah dalam koordinasi proteksi yang mengakibatkan ketidakmampuan sistem untuk menjaga kontinuitas aliran listrik ke konsumen. Dalam sistem distribusi, gangguan sering kali terjadi akibat peristiwa tak terduga, seperti hubung singkat, kegagalan teknis pada perangkat utama, atau bencana alam. Selain itu, kondisi ini juga dapat dipengaruhi oleh faktor operasional, seperti kurangnya pemeliharaan atau pengaturan proteksi yang tidak optimal (Wasahua et al., 2021). Dampak-dampak ini dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama:

1. Pemadaman Listrik

Gangguan dapat menyebabkan pemadaman listrik yang berkepanjangan. Durasi pemadaman ini sangat bergantung pada jenis dan penyebab gangguan. Pemadaman yang lama dapat mengganggu aktivitas sehari-hari, terutama di daerah yang sangat bergantung pada listrik untuk kebutuhan dasar.

2. Kerugian Ekonomi

Bisnis dan industri yang terganggu oleh pemadaman listrik dapat mengalami kerugian finansial yang signifikan. Kehilangan produksi dan penjualan selama pemadaman dapat berdampak langsung pada profitabilitas perusahaan.

Pemadaman listrik yang berkepanjangan dapat mempengaruhi kegiatan ekonomi secara keseluruhan, termasuk sektor perdagangan, manufaktur, dan layanan. Hal ini dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan ekonomi di daerah yang terkena dampak.

3. Kerusakan Peralatan

Lonjakan tegangan atau pemadaman mendadak dapat merusak peralatan elektronik dan listrik, seperti komputer, mesin industri, dan perangkat rumah tangga. Kerusakan ini tidak hanya mengakibatkan biaya perbaikan, tetapi juga dapat mengganggu proses produksi.

4. Dampak pada Kesehatan dan Keselamatan

Pemadaman listrik dapat menyebabkan situasi berbahaya, seperti lampu lalu lintas yang mati, yang dapat meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas. Selain itu, pemadaman di fasilitas kesehatan dapat mengancam keselamatan pasien yang bergantung pada peralatan medis.

5. Dampak Lingkungan

Dalam beberapa kasus, pemadaman listrik dapat memaksa pembangkit listrik darurat berbahan bakar fosil untuk beroperasi, yang dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Hal ini berpotensi memperburuk masalah perubahan iklim.

6. Dampak Sosial

Pemadaman listrik yang sering dan berkepanjangan dapat menyebabkan ketidakpuasan di kalangan masyarakat, yang dapat berujung pada protes atau tuntutan terhadap penyedia layanan listrik. Ketidakpuasan ini dapat mempengaruhi reputasi penyedia layanan.

7. Dampak pada Keandalan Sistem

Penurunan Keandalan: Frekuensi dan durasi gangguan dapat menurunkan keandalan sistem distribusi listrik secara keseluruhan. Hal ini dapat mempengaruhi perencanaan dan investasi di masa depan, serta meningkatkan biaya operasional.

2.5 Metode *Fault Tree Analysis* (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) adalah suatu metode analisis deduktif yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan atau kegagalan dalam suatu sistem dengan merepresentasikan hubungan antar kejadian dalam bentuk diagram terstruktur. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang sistematis terhadap berbagai kemungkinan penyebab kegagalan, sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai interaksi antar komponen dalam sistem. FTA sangat cocok digunakan pada sistem yang kompleks karena mampu menyederhanakan hubungan antara berbagai elemen kegagalan. Pendekatan ini menggunakan metode top-down, yaitu memulai analisis dari peristiwa utama atau top event, kemudian menelusuri akar penyebabnya dengan mengevaluasi interaksi di antara berbagai komponen atau objek yang saling terkait dalam sistem (Saiful Mangnggenre, Mulyadi, 2017). Pengembangan diagram pohon kesalahan umumnya dilakukan melalui enam tahapan utama, yaitu: penentuan top event, identifikasi penyebab yang relevan, penyusunan struktur pohon kesalahan, evaluasi diagram, pengujian serta analisis hasil, dan diakhiri dengan penarikan kesimpulan dari keseluruhan proses analisis

(Yetkin et al., 2024).

Titik awal dalam analisis *Fault Tree Analysis* (FTA) adalah proses pengidentifikasian mode kegagalan pada tingkat tertinggi suatu sistem, yang dikenal sebagai Top Level Event. Diagram pohon kesalahan (*Fault Tree*) digunakan untuk menggambarkan hubungan antara kejadian dasar (*Basic Event*) dan kejadian utama (*Top Event*) dalam sistem. Hubungan ini diwakili oleh gerbang logika yang menunjukkan bagaimana peristiwa dasar berkontribusi pada kegagalan sistem. Dari diagram *Fault Tree*, dapat disusun cut set dan minimal cut set. Cut set adalah ekumpulan komponen dalam sistem yang, jika mengalami kegagalan, dapat menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan dan minimal cut set adalah subset terkecil dari cut set yang cukup untuk menyebabkan kegagalan sistem. FTA dilakukan melalui langkah-langkah terstruktur untuk menganalisis dan memahami sistem. Berikut adalah tahapan dalam penerapan FTA (Wasahua et al., 2021) :

1. Identifikasi Kejadian Utama dalam Sistem (*Top Level Event*)

Tahap pertama adalah mengidentifikasi kejadian atau peristiwa yang paling penting dalam sistem. Langkah ini sangat krusial karena akan mempengaruhi hasil akhir analisis.

2. Membuat Diagram Pohon Kesalahan

Setelah kejadian utama diidentifikasi, langkah berikutnya adalah menyusun diagram yang menggambarkan hubungan sebab-akibat menggunakan Fault Tree. Diagram ini mencakup struktur logika yang menghubungkan berbagai komponen dan peristiwa yang dapat menyebabkan kegagalan sistem. Pada tahap ini, diagram *Cause and Effect* dapat digunakan untuk menganalisis penyebab masalah dan mengeksplorasi kemungkinan kerusakan tersembunyi. Pembuatan diagram fault tree menggunakan simbol-simbol logika Boolean yang distandarkan untuk memastikan konsistensi dan kemudahan komunikasi.

3. Analisis Pohon Kesalahan

Analisis dilakukan untuk memperoleh wawasan yang jelas tentang sistem dan menentukan langkah perbaikan yang diperlukan. Tahapan dalam analisis ini meliputi:

- a) Penyederhanaan Pohon Kesalahan

Pada tahap ini, diagram pohon kesalahan disederhanakan dengan menghilangkan cabang-cabang yang memiliki karakteristik serupa. Penyederhanaan ini bertujuan untuk mempermudah analisis lebih lanjut.

b) Penentuan Peluang Kejadian

Setelah diagram disederhanakan, tahap berikutnya adalah menghitung peluang terjadinya *Top Level Event*. Pada langkah ini, peluang dari semua input serta hubungan logika di dalam pohon dipertimbangkan untuk menentukan probabilitas kejadian utama dalam sistem.

c) Peninjauan Hasil Analisis

Langkah terakhir adalah mereview hasil analisis untuk mengidentifikasi potensi perbaikan dalam sistem. *Output* dari FTA mencakup peluang terjadinya kejadian utama dalam sistem serta akar penyebab masalahnya. Informasi ini digunakan untuk menentukan prioritas tindakan perbaikan yang tepat.

Berikut adalah beberapa kelebihan metode *Fault Tree Analysis (FTA)* :

FTA menggunakan pendekatan top-down, yaitu dimulai dari kejadian puncak (*top event*) dan dianalisis secara bertingkat hingga ke penyebab paling dasar (*basic events*). Pendekatan ini memungkinkan analisis untuk:

1. Fokus pada satu kejadian kritis terlebih dahulu,
2. Menelusuri hubungan sebab-akibat secara logis,
3. Menyusun struktur logika kegagalan dengan rapi.
4. Membantu Menentukan Prioritas Perbaikan, dengan mengetahui kombinasi penyebab yang paling kritis (*cut set*), FTA membantu dalam menyusun langkah mitigasi dan perbaikan sistem secara tepat sasaran.

Untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai keandalan sistem distribusi listrik, diperlukan pendekatan yang tidak hanya mengidentifikasi penyebab gangguan, tetapi juga mampu mengukur dampaknya terhadap pelanggan. Dalam hal ini, metode *Fault Tree Analysis (FTA)* dan indikator keandalan SAIDI serta SAIFI saling melengkapi.

Adapun keandalan SAIDI dan SAIFI memiliki hubungan yang kuat. Hasil analisis FTA menunjukkan apa penyebab utama terjadinya gangguan, sementara nilai SAIDI dan SAIFI menggambarkan seberapa besar dampak gangguan tersebut

terhadap pelanggan.

Kombinasi keduanya dapat digunakan untuk:

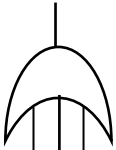
1. Menentukan prioritas perbaikan → berdasarkan penyebab gangguan yang paling sering terjadi dan paling berdampak.
2. Menilai efektivitas perbaikan → apabila upaya mitigasi terhadap penyebab yang teridentifikasi melalui FTA berhasil dilakukan, maka diharapkan nilai SAIDI dan SAIFI akan menurun.

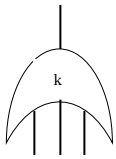
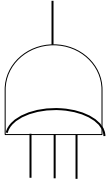
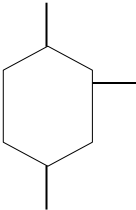
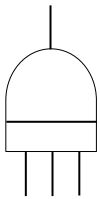
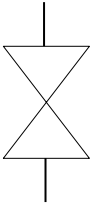
Hasil akhir FTA adalah grafik enumerasi, yaitu representasi pohon kesalahan yang menggambarkan bagaimana kegagalan dapat terjadi. Diagram ini menggunakan simbol logika Boolean untuk menunjukkan struktur hierarkis sistem. Grafik enumerasi dinamakan pohon kesalahan karena bentuknya menyerupai pohon, dengan satu kejadian utama di bagian atas yang bercabang menjadi kejadian-kejadian lainnya di bagian bawah. Simbol-simbol dalam Fault Tree Analysis dapat dibedakan menjadi dua yaitu (Wasahua et al., 2021) :

1. Simbol-Simbol Gate

Simbol gate digunakan untuk merepresentasikan hubungan antara berbagai kejadian dalam sebuah sistem. Kejadian-kejadian ini dapat terjadi secara individu atau bersamaan untuk memicu terjadinya kejadian lain. Simbol-simbol yang digunakan dalam *Fault Tree Analysis* (FTA) menggambarkan jenis interaksi atau kontribusi antara kejadian-kejadian tersebut. Penjelasan mengenai simbol-simbol hubungan dalam FTA dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. 4Simbol Gate

No	Simbol Gate	Nama dan Keterangan
1		And gate. Output event terjadi jika semua input event terjadi secara bersamaan
2		Or Gate. Output event terjadi jika paling tidak satu input event terjadi

No	Simbol Gate	Nama dan Keterangan
3		K out of n gate. Output event terjadi jika paling sedikit k output dari n input event terjadi
4		Exchisive OR gate. Output event terjadi jika satu input event, tetapi tidak terjadi
5		Inhibit gate. Input menghasilkan output jika conditional event ada
6		Priority AND gate. Output event terjadi jika semua input event terjadi baik dari kanan maupun kiri
7		Not gate. Output event terjadi jika input event tidak terjadi

Gerbang AND Gerbang AND digunakan untuk menghasilkan logika 1 jika semua masukan berlogika 1, jika tidak maka output yang akan di hasilkan akan berlogika 0. Seperti yang terdapat pada tabel kebenaran di bawah ini.

Tabel 2. 5 Hubungan dua kejadian dengan logika AND

Kejadian 1	Kejadian 2	Hasil
1	1	1

Kejadian 1	Kejadian 2	Hasil
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Gerbang OR Gerbang OR digunakan untuk menghasilkan logika 0 jika semua masukan berlogika 0, jika tidak maka output akan berlogika 1. Seperti yang terdapat pada tabel kebenaran di bawah ini.

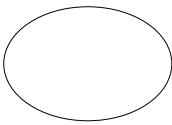
Tabel 2. 6 Hubungan dua kejadian dengan kejadian OR

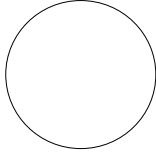
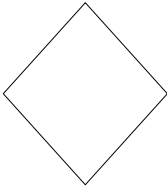
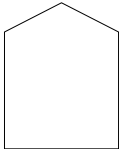
Kejadian 1	Kejadian 2	Hasil
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

2. Simbol-Simbol Kejadian (*Event*)

Simbol kejadian digunakan untuk merepresentasikan karakteristik dari setiap kejadian yang terjadi dalam sistem. Penggunaan simbol-simbol ini membantu mempermudah proses identifikasi dan analisis terhadap kejadian-kejadian yang muncul. Berbagai simbol kejadian yang diterapkan dalam *Fault Tree Analysis* (FTA) dijelaskan sebagai berikut.

Tabel 2. 7 Kejadian (Even)

No	Simbol Gate	Nama dan Keterangan
1		<i>Elipse</i> Gambar <i>elipse</i> menunjukkan kejadian pada level paling atas (<i>top level event</i>) dalam pohon kesalahan
2		<i>Rectangle</i> Gambar <i>rectangle</i> menunjukkan kejadian pada level menengah (<i>intermediate fault event</i>) dalam pohon kesalahan

No	Simbol Gate	Nama dan Keterangan
3		<i>Circle</i> Gambar <i>circle</i> menunjukkan kejadian pada level paling <i>bawah (lowest level event)</i> atau disebut kejadian paling dasar (<i>basic event</i>) dalam pohon kesalahan
4		<i>Diamond</i> Gambar <i>diamond</i> menunjukkan kejadian tidak terduga (<i>undeveloped event</i>). Kejadian tidak terduga dapat dilihat pada pohon kesalahan dan dianggap sebagai kejadian paling awal menyebabkan kerusakan
5		<i>House</i> Gambar <i>house</i> menunjukkan kejadian input (<i>input event</i>) dan merupakan kegiatan terkendali (<i>signal</i>). Kegiatan ini dapat menyebabkan kerusakan.

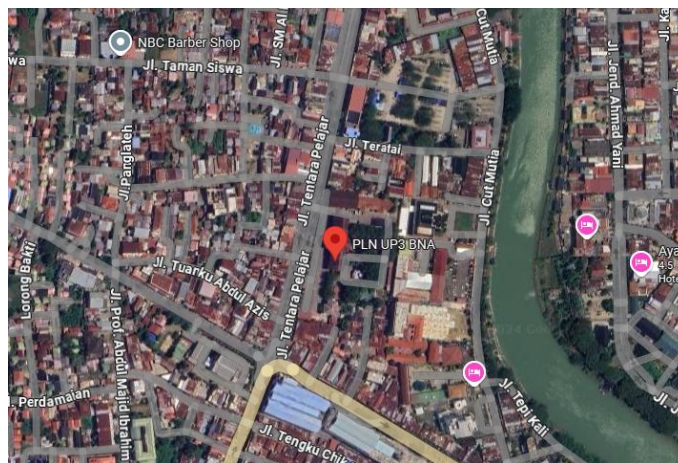
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Pelaksanaan kegiatan ini berlangsung selama tiga bulan, dimulai pada 1 November 2024 hingga Januari 2025. Proses ini mencakup seluruh tahapan, mulai dari persetujuan proposal hingga selesainya penelitian. Lokasi yang dipilih untuk pelaksanaan penelitian adalah PT PLN UP3 Banda Aceh.

Pemilihan lokasi ini didasarkan pada relevansi dan ketersediaannya sebagai objek penelitian, yang diharapkan dapat memberikan data dan informasi yang sesuai untuk mendukung tujuan studi. Dalam rentang waktu tersebut, semua aktivitas penelitian akan dilakukan secara terstruktur, termasuk pengumpulan data, analisis, hingga penyusunan laporan akhir.



Gambar 3. 1 PLN UP3 Banda Aceh

3.2 Bahan dan Alat

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat keras dan lunak yang mendukung proses analisis data serta pengolahan informasi. Peralatan utama yang digunakan adalah laptop sebagai media pengolahan data dan analisis, serta perangkat lunak Microsoft Office yang dimanfaatkan untuk dokumentasi, pembuatan laporan, dan analisis data.

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data penyebab gangguan jaringan distribusi yang diperoleh dari PT PLN UP3 Banda Aceh menjadi bahan utama dalam penelitian. Kombinasi alat dan bahan ini dirancang untuk memastikan kelancaran penelitian.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan langkah awal berupa perumusan masalah yang menjadi fokus utama kajian kemudian dilanjutkan dengan penerapan serangkaian langkah yang sistematis guna menyelesaikan tugas akhir ini. Tahapan-tahapan tersebut mencakup pengumpulan data, analisis, hingga interpretasi hasil. Semua langkah dirancang secara terstruktur untuk mencapai hasil penelitian yang sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Langkah-langkah yang diperlukan untuk menyelesaikan tugas terakhir ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan studi literatur untuk memperoleh berbagai sumber teori dan konsep untuk mendukung penelitian yang akan dilaksanakan.
2. Menyiapkan alat dan bahan penelitian.
3. Melakukan pengumpulan data penelitian.
4. Identifikasi Penyebab dan Akibat Kerusakan Jaringan
5. Membuat Fault Tree Analysis dan usulan perbaikan
6. Menarik kesimpulan dari hasil identifikasi dan metode analisa yang telah dilakukan.
7. Selesai

3.4 Pengumpulan Data

Penelitian ini mengandalkan data yang diperoleh secara tidak langsung dari berbagai sumber. Yaitu mencakup data informasi yang dikumpulkan dari buku, jurnal, laporan, serta arsip data yang dimiliki oleh instansi terkait. Data ini berperan penting sebagai pendukung penelitian, membantu peneliti dalam mengidentifikasi masalah, melakukan tinjauan pustaka, serta menyusun analisis yang komprehensif.

Data kelistrikan Kota Banda Aceh diperoleh dari Badan Pusat Statistik yang akan digunakan untuk menganalisa nilai indeks keandalan sistem. Data kelistrikan Kota Banda Aceh tahun 2022 dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 1 Data Kelistrikan Kota Banda Aceh

No	Uraian	Jumlah
1	Produksi (kWh)	42.825.326
2	Penjualan (X Rp 1.000)	730.241
3	Gardu Hubung (Unit)	13
4	Trafo Distribusi (Buah)	2.828
5	Panjang JTM (kms)	1.717,14
6	Panjang JTR (kms)	2.745,45
7	Pembangkit Non PLN (kVA)	-
8	Pelanggan (Orang)	255.409
9	Daya Tersambung (VA)	485.823,57
10	Terima (kWh Salur) (kWh)	791.834.788
11	Penjualan (kWh)	730.241.630
12	Daya Trafo Distribusi (kVA)	261.757
13	Jumlah Kecamatan Terlistriki	9
14	Jumlah Desa Terlistriki	90
15	Jumlah Desa Seluruhnya	90
16	Rata-rata tarif per Kwh	1.137,26

Untuk menunjang analisis keandalan pada sistem distribusi listrik, diperlukan data historis terkait kejadian pemadaman yang terjadi di area studi. Informasi tersebut meliputi waktu kejadian, lama pemadaman, jumlah pelanggan yang terdampak, serta lokasi terjadinya gangguan. Melalui data riwayat pemadaman ini, dapat dilakukan identifikasi terhadap pola gangguan serta penilaian terhadap frekuensi dan durasi pemadaman yang terjadi. Rangkuman data pemadaman selama periode penelitian disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. 2 Riwayat Pemadaman Bulan Januari 2022

No	Penyulang	Jumlah Pelanggan Padam	Lama Padam (jam)	Jam x Pelanggan Padam
1	11.GIJTH.F02/LAMTEUBA	667	0,07	46,69
2	11.GIULK.F5 / Radar	2.193	0,07	153,51
3	11.GIULK.F5 / Radar	439	0,53	232,67
4	11.GIBNA.F02 / BA01	1.258	0,02	25,16
5	11.GIBNA.F05 / BA5	1.517	0,08	121,36
6	11.GIBNA.F24 / BA31	411	0,07	28,77
7	11.GIBNA.F01 / BA2	1.945	0,07	136,15
8	11.GIBNA.F13 / BA20	540	0,08	43,2
9	11.GIBNA.F15 / BA22	600	0,08	48
10	11.GIBNA.F25 / BA32	652	0,08	52,16
11	11.GIBNA.F03 / BA3	1.675	0,02	33,5
12	11.GIJTH.F05 / JT5	243	0,03	7,29
13	11.GIBNA.F02 / BA01	280	0,08	22,4
14	11.GIBNA.F18 / BA25	3.912	0,08	312,96
15	11.GIBNA.F10 / BA14	2.193	0,07	153,51
16	11.GIJTH.F02/LAMTEUBA	439	0,08	35,12
17	11.GIJTH.F05 / JT5	411	0,08	32,88
18	11.GIBNA.F04 / BA4	4.809	0,2	961,8
19	11.GIBNA.F04 / BA4	641	0,08	51,28
20	11.GIULK.F01 / UL01	540	0,08	43,2
21	11.GIULK.F01 / UL01	6.571	0,05	328,55
22	11.GIBNA.F01 / BA2	667	0,42	280,14
23	11.GIBNA.F05 / BA5	1.343	0,07	94,01
24	11.GIBNA.F18 / BA25	540	0,07	37,8
25	11.PLAL.F03/PAYA SEUNARA	600	0,03	18

No	Penyulang	Jumlah Pelanggan Padam	Lama Padam (jam)	Jam x Pelanggan Padam
26	11.GIBNA.F01 / BA2	2.314	0,07	161,98
27	11.GIBNA.F09 / BA13	280	0,08	22,4
28	11.GIBNA.F02 / BA01	629	0,03	18,87
29	11.GIJTH.F05 / JT5	1.792	0,03	53,76
30	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	1.945	0,05	97,25
31	11.GIKRY.F05 / KY05	540	0,08	43,2
32	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	667	0,03	20,01
33	11.GIBNA.F23 / BA30	641	0,05	32,05
34	11.GIBNA.F23 / BA30	378	0,05	18,9
35	11.GIBNA.F23 / BA30	5.395	0,07	377,65
36	11.GIJTH.F03 / KOTA JANTHO	5.615	0,07	393,05

3.5 Analisa Data

Metode pengolahan data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah *Fault Tree Analysis* (FTA). Metode FTA diterapkan untuk mengidentifikasi berbagai faktor yang menjadi penyebab utama kegagalan sistem. Proses ini membutuhkan pengumpulan dan pengolahan data yang akurat guna membangun diagram pohon kegagalan secara sistematis. Pada tahap pelaksanaannya, FTA digunakan untuk menganalisis akar penyebab permasalahan yang memiliki dampak signifikan terhadap kegagalan jaringan distribusi tenaga listrik. Pendekatan ini memanfaatkan analisis deduktif untuk mengidentifikasi basic events, yaitu kejadian-kejadian kecil yang berkontribusi pada terjadinya kegagalan sistem secara keseluruhan. Data yang diperlukan untuk analisis ini mencakup informasi detail mengenai peralatan sistem, kondisi operasional, riwayat kejadian kegagalan sebelumnya, serta faktor-faktor lain yang berpotensi memengaruhi kinerja jaringan. Dengan menggunakan pendekatan FTA, penelitian dapat menyusun pemetaan yang jelas dan terstruktur mengenai penyebab utama kegagalan, sehingga memudahkan proses identifikasi solusi yang tepat. Tahapan-

tahapan FTA melibatkan pengumpulan data, pembangunan diagram pohon kegagalan, analisis hubungan antar kejadian, dan evaluasi dampak dari setiap faktor penyebab. Tahapan FTA adalah:

1. Identifikasi kegagalan dalam sistem

Tahap identifikasi kegagalan sistem dilakukan untuk menentukan kegagalan utama yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik. Kegagalan utama ini kemudian digunakan sebagai *Top Level Event* dalam analisis. Pada tahap ini, peneliti mengumpulkan data mengenai kejadian-kejadian yang tidak diinginkan dalam sistem distribusi tenaga listrik. Dari data tersebut, dipilih satu kejadian yang dianggap paling signifikan atau kritis, dikenal sebagai *Undesired Event*, untuk dijadikan *Top Level Event*.

2. Penciptaan Pohon Kesalahan.

Diagram pohon kegagalan (*fault tree diagram*) dibuat dengan menggunakan simbol-simbol logika boolean, yang mencakup simbol untuk menggambarkan kejadian serta simbol untuk menunjukkan hubungan antar kejadian yang dapat menyebabkan gangguan. Diagram ini memvisualisasikan seluruh rangkaian sebab dan akibat yang mengarah pada terjadinya suatu gangguan pada sistem.

Tahapan untuk menyusun diagram pohon kegagalan meliputi:

- a) Mengidentifikasi lokasi gangguan pada sistem jaringan distribusi tenaga listrik.
- b) Menyusun dan menggambar diagram pohon kegagalan berdasarkan hasil identifikasi pada sistem jaringan distribusi tenaga listrik.

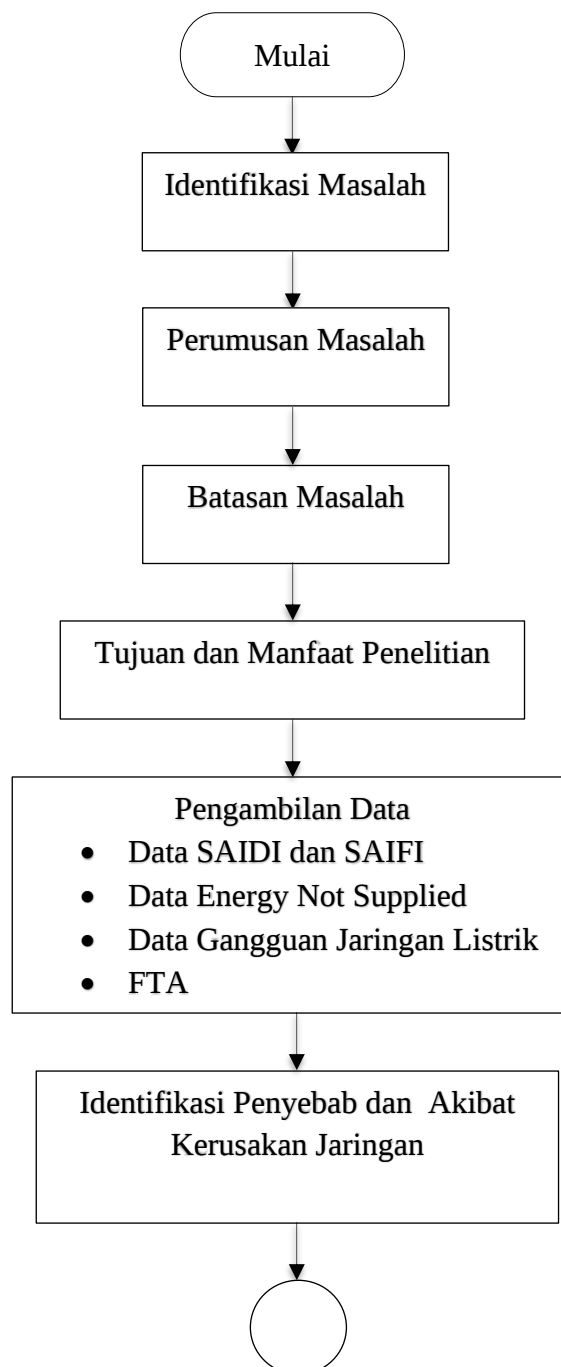
Proses ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang terstruktur mengenai hubungan antar faktor penyebab gangguan, Menentukan kombinasi minimal *cut set* (akar permasalahan).

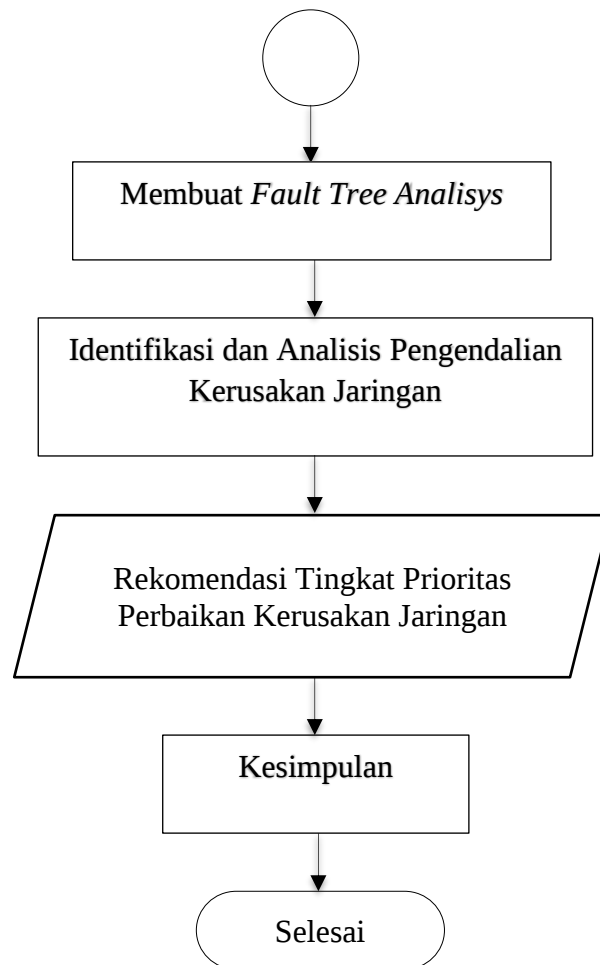
Penentuan minimal *cut set* dilakukan setelah menyusun berbagai penyebab kerusakan pada setiap tingkat kejadian dalam sistem. Dari tingkat-tingkat tersebut, akan diidentifikasi tingkat paling dasar yang menjadi hasil akhir dari minimal cut set. Hasil ini berupa kejadian tunggal atau kombinasi kejadian yang menjadi akar masalah utama. Proses ini melibatkan identifikasi menyeluruh terhadap semua kejadian yang terjadi, diikuti dengan langkah penyederhanaan untuk menentukan faktor-faktor kunci penyebab gangguan.

3. Mengidentifikasi Penyebab Kerusakan Sistem

Pada tahap ini, dilakukan identifikasi terhadap faktor-faktor yang menyebabkan kerusakan, dampak yang ditimbulkan oleh kerusakan tersebut,. Proses ini bertujuan untuk memahami secara menyeluruh akar permasalahan, konsekuensinya, dan upaya mitigasi yang diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem.

3.6 Alur Penelitian





BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap ini merupakan bagian penting dalam proses penelitian, yaitu tahap pengumpulan dan pengolahan data. Data yang digunakan diperoleh dari catatan gangguan jaringan listrik milik PLN yang dicatat secara rutin setiap bulan. Data tersebut mencakup berbagai jenis gangguan yang terjadi di lapangan, termasuk frekuensi, durasi, serta lokasi gangguan.

Setelah data terkumpul, dilakukan proses pengolahan data menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk menganalisis akar penyebab gangguan secara sistematis. Dalam tahap ini, setiap komponen yang berpotensi mengalami gangguan dianalisis menggunakan pendekatan logika sebab-akibat. Untuk menunjang proses pengolahan dan analisis data, digunakan perangkat lunak Microsoft Excel, yang berperan dalam pengelompokan data, pembuatan grafik, serta perhitungan statistik dasar.

4.1 Analisis Indeks Keandalan SAIDI dan SAIFI

Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keandalan sistem distribusi listrik berdasarkan dua indikator utama, yaitu SAIDI (System Average Interruption Duration Index) dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). Kedua indeks ini digunakan untuk mengukur rata-rata durasi dan frekuensi pemadaman yang dialami pelanggan dalam periode tertentu.

4.1.1 Perhitungan SAIDI SAIFI perbulan

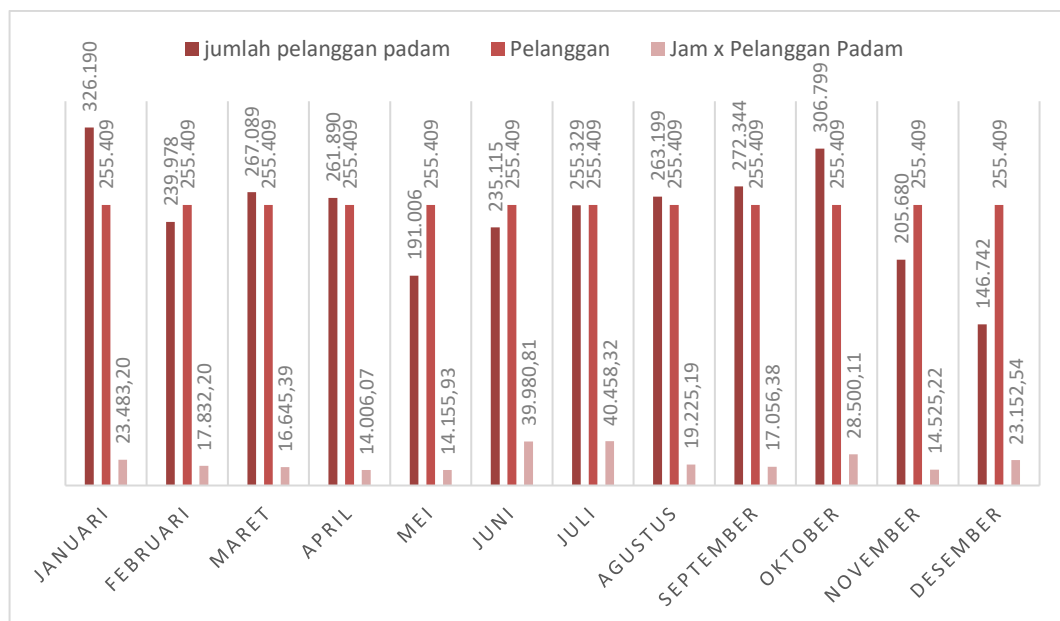
Hasil penjumlahan riwayat pemadaman selama bulan Januari sampai dengan Desember 2022 dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. 1 Data Riwayat Pemadaman

Bulan	jumlah pelanggan padam	Pelanggan	Jam x Pelanggan Padam
Januari	326.190	255.409	23.483,2
Februari	239.978	255.409	17.832,2
Maret	267.089	255.409	16.645,39
April	261.890	255.409	14.006,07

Bulan	jumlah pelanggan padam	Pelanggan	Jam x Pelanggan Padam
Mei	191.006	255.409	14.155,93
Juni	235.115	255.409	39.980,81
Juli	255.329	255.409	40.458,32
Agustus	263.199	255.409	19.225,19
September	272.344	255.409	17.056,38
Oktober	306.799	255.409	28.500,11
November	205.680	255.409	14.525,22
Desember	146.742	255.409	23.152,54

Adapun perbandingan jumlah pelanggan padam, pelanggan dan jumlah x jam pelanggan padam dapat dilihat pada Gambar berikut :



Gambar 4. 1 Perbandingan jumlah pelanggan dan jumlah jam pelanggan

Grafik menunjukkan jumlah pelanggan padam, total pelanggan, dan Jam x Pelanggan Padam selama Januari hingga Desember. Jumlah pelanggan tetap sebesar 255.409 tiap bulan, namun gangguan bervariasi. Januari dan Oktober tercatat sebagai bulan dengan gangguan tertinggi, dengan jumlah pelanggan padam masing-masing 326.190 dan 306.799, serta tingkat keparahan tertinggi. Desember menjadi bulan dengan gangguan terendah. Data ini mencerminkan fluktuasi

keandalan jaringan distribusi listrik sepanjang tahun.

Berdasarkan data yang di peroleh maka dapat di lakukan perhitungan SAIDI dan SAIFI perbulan seperti di bawah ini :

Bulan januari :

$$SAIDI = \frac{\Sigma (jam \times pelanggan padam)}{total pelanggan}$$

$$SAIDI = \frac{23.483,2}{255.409}$$

$$SAIDI = 0,09194351 \text{ Jam /pelanggan/bulan}$$

$$SAIFI = \frac{Jumlah Pelanggan padam}{Total pelanggan}$$

$$SAIFI = \frac{326.190}{255.409}$$

$$SAIFI = 1,277128057 \text{ Jam /pelanggan /bulan}$$

4.1.2 Analisa SAIDI SAIFI Pertahun

Setelah di lakukan hitungan perbulan maka analisa nilai SAIDI pertahun akan di peroleh tabel seperti berikut :

Tabel 4. 2 Nilai SAIDI

Bulan	Jam x Pelanggan Padam	Pelanggan	SAIDI
Januari	23.483,2	255.409	0,09194351
Februari	17.832,2	255.409	0,069818213
Maret	16.645,39	255.409	0,065171509
April	14.006,07	255.409	0,054837809
Mei	14.155,93	255.409	0,055424554
Juni	39.980,81	255.409	0,156536418
Juli	40.458,32	255.409	0,158406008
Agustus	19.225,19	255.409	0,075272171
September	17.056,38	255.409	0,066780654
Oktober	28.500,11	255.409	0,111586162

November	14.525,22	255.409	0,056870431
Desember	23.152,54	255.409	0,090648881

Setelah memperoleh hasil nilai indeks keandalan perbulan selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai rata-rata pertahunnya. Perhitungan untuk mendapatkan nilai rata-rata SAIDI pertahun adalah sebagai berikut:

$$d_{rata-rata} = \frac{d1 + d2 + d3 + \dots + d12}{12}$$

$$= \frac{0,09194351 + 0,069818213 + 0,065171509 + \dots + 0,090648881}{12}$$

$$= 0,087774693 \text{ kali/pelanggan/tahun}$$

Bulan	Pelanggan	Jumlah pelanggan padam	Jam X pelanggan padam	SAIDI
Januari	255.409	313.950	23483,2	0,091944
Februari	255.409	239.978	17832,2	0,069818
Maret	255.409	267089	16645,39	0,065172
April	255.409	261890	14006,07	0,054838
Mei	255.409	191006	14155,93	0,055425
Juni	255.409	235115	39980,81	0,156536
Juli	255.409	255329	40458,32	0,158406
Agustus	255.409	263199	19225,19	0,075272
September	255.409	272344	17056,38	0,066781
Oktober	255.409	306799	28500,11	0,111586
November	255.409	205680	14525,22	0,05687
Desember	255.409	146742	23152,54	0,090649

Gambar 4. 2 Perhitungan SAIDI Menggunakan Excel

Nilai SAIDI dapat dihitung dengan menggunakan program Excel dimana jam pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani yaitu dengan rumus = D2/B2. Setelah dilakukan hitungan perbulan maka analisa nilai SAIFI akan di peroleh tabel seperti berikut :

Tabel 4. 3 Nilai SAIFI

Bulan	Jumlah pelanggan padam	Pelanggan	SAIFI
Januari	326.190	255.409	1,277128057

Bulan	Jumlah pelanggan padam	Pelanggan	SAIFI
Februari	239.978	255.409	0,939583178
Maret	267.089	255.409	1,045730573
April	261.890	255.409	1,025374987
Mei	191.006	255.409	0,747843655
Juni	235.115	255.409	0,920543129
Juli	255.329	255.409	0,999686777
Agustus	263.199	255.409	1,0305001
September	272.344	255.409	1,066305416
Oktober	306.799	255.409	1,201206692
November	205.680	255.409	0,805296603
Desember	146.742	255.409	0,574537311

Setelah memperoleh hasil nilai indeks keandalan perbulan selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai rata-rata pertahunnya. Perhitungan untuk mendapatkan nilai rata-rata SAIFI pertahun adalah sebagai berikut:

$$f_{rata-rata} = \frac{f1 + f2 + f3 + \dots + f12}{12}$$

$$= \frac{1,277128057 + 0,939583178 + 1,045730573 + \dots + 0,574537311}{12}$$

$$= 0,96947804 \text{ kali/pelanggan/tahun}$$

Bulan	Pelanggan	Jumlah pelanggan padam	Jam X pelanggan padam	SAIFI
Januari	255.409	313.950	23483,2	1,229205
Februari	255.409	239.978	17832,2	0,939583
Maret	255.409	267089	16645,39	1,045731
April	255.409	261890	14006,07	1,025375
Mei	255.409	191006	14155,93	0,747844
Juni	255.409	235115	39980,81	0,920543
Juli	255.409	255329	40458,32	0,999687
Agustus	255.409	263199	19225,19	1,0305
September	255.409	272344	17056,38	1,066305
Oktober	255.409	306799	28500,11	1,201207

Bulan	Pelanggan	Jumlah pelanggan padam	Jam X pelanggan padam	SAIFI
November	255.409	205680	14525,22	0,805297
Desember	255.409	146742	23152,54	0,574537

Gambar 4. 3 Perhitungan SAIFI Menggunakan Excel

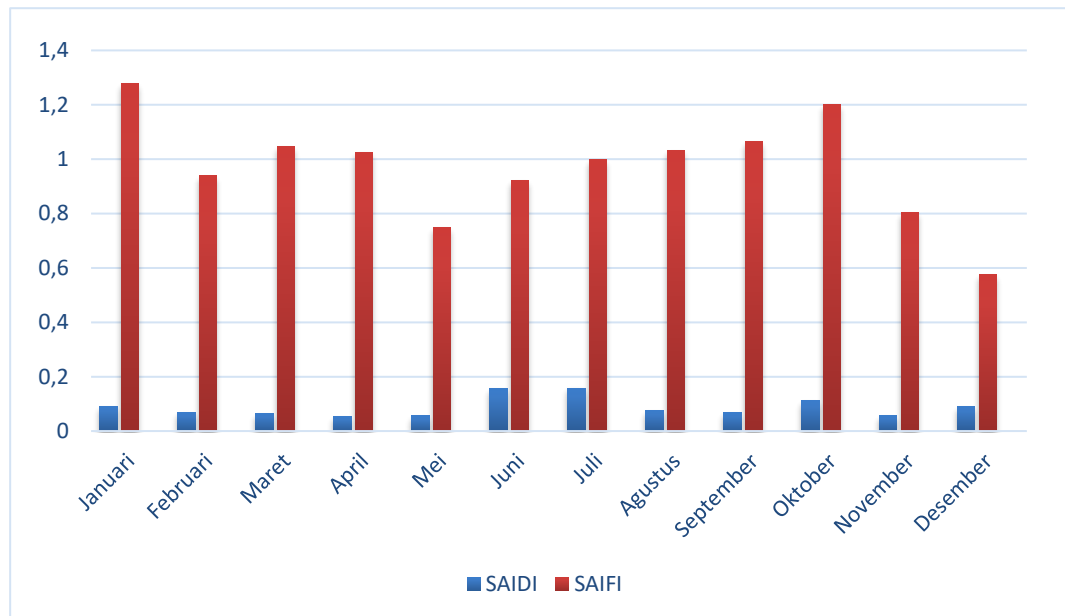
Nilai SAIFI dapat dihitung dengan menggunakan program Excel dimana jumlah pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani yaitu dengan rumus = C2/B2.

Dengan menggunakan rumus yang sama didapatkan hasil analisa SAIDI dan SAIFI selama bulan Januari – Desember 2022 seperti pada Tabel 4.18 berikut.

Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai SAIFI dan SAIDI

No	Bulan	SAIDI	SAIFI
1	Januari	0,09194351	1,277128057
2	Februari	0,069818213	0,939583178
3	Maret	0,065171509	1,045730573
4	April	0,054837809	1,025374987
5	Mei	0,055424554	0,747843655
6	Juni	0,156536418	0,920543129
7	Juli	0,158406008	0,999686777
8	Agustus	0,075272171	1,0305001
9	September	0,066780654	1,066305416
10	Oktober	0,111586162	1,201206692
11	November	0,056870431	0,805296603
12	Desember	0,090648881	0,574537311

Tabel 4.6 menunjukkan hasil perhitungan nilai indeks keandalan SAIDI, SAIFI dimulai dari bulan Januari sampai dengan Desember 2022. Frekuensi gangguan terbanyak terjadi pada bulan Januari dengan nilai SAIFI sebesar 1,277128057 kali pemadaman/bulan. Hasil perhitungan indeks keandalan SAIDI dan SAIFI, perbulan selama 2022 ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan SAIDI dan SAIFI

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai indeks keandalan sistem distribusi listrik pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) di wilayah kerja PLN UP3 Banda Aceh selama periode Januari hingga Desember tahun 2022. Nilai *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) tercatat sebesar 0,0878 jam/pelanggan/tahun, yang menunjukkan rata-rata lama gangguan listrik yang dialami oleh setiap pelanggan dalam satu tahun. Sementara itu, nilai *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) mencapai 0,9695 kali/pelanggan/tahun, yang menggambarkan rata-rata frekuensi gangguan yang dialami oleh pelanggan selama periode yang sama.

4.1.3 Analisa Tingkat Keandalan SAIFI, SAIDI terhadap SPLN

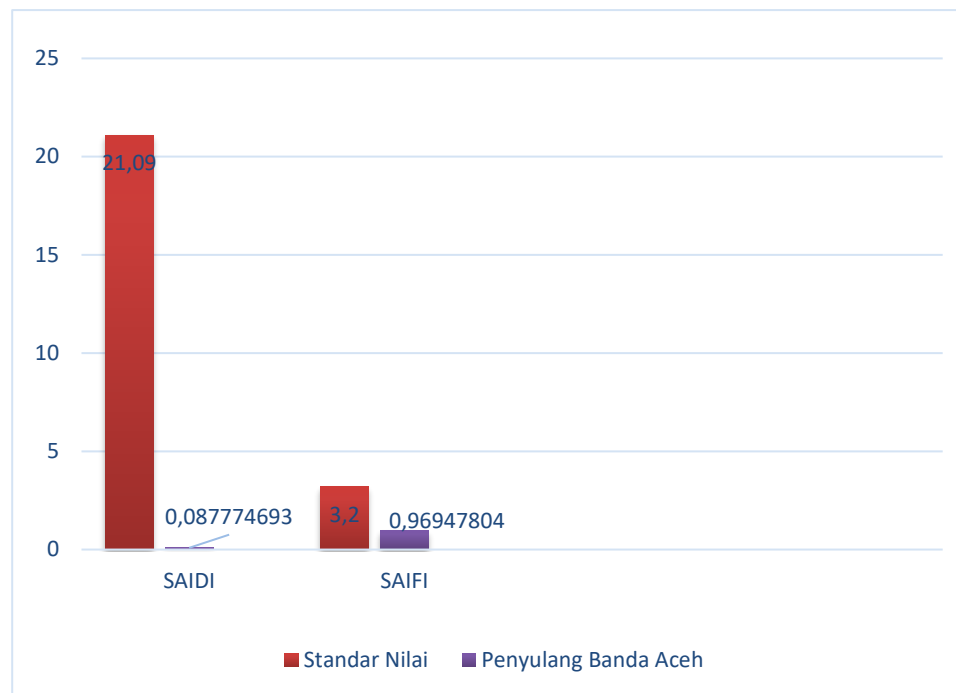
Setelah diperoleh nilai rata-rata indeks keandalan SAIDI dan SAIFI selama setahun, langkah selanjutnya adalah membandingkannya dengan standar SPLN 68-2: 1986. Perbandingan antara nilai indeks keandalan SAIDI, SAIFI, dan standar SPLN dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 5 Perbandingan nilai indeks keandalan SAIDI, SAIFI, dan standar SPLN

Indeks Keandalan	Standar Nilai	Penyulang Banda Aceh	Satuan
SAIDI	21,09	0,087774693	Jam/pelanggan/tahun
SAIFI	3,2	0,96947804	kali/pelanggan/tahun

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai SAIDI pada penyulang Banda Aceh masih memenuhi standar yang ditetapkan, dengan hasil sebesar 0,087774693 jam/pelanggan. Hal ini disebabkan oleh rendahnya durasi padam yang dialami oleh masing-masing pelanggan. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan batas maksimum yang diizinkan oleh standar SPLN, yaitu 21,09 jam/pelanggan/tahun, yang menunjukkan bahwa tingkat keandalan penyulang Banda Aceh sangat baik. Sementara itu, nilai SAIFI pada penyulang Banda Aceh tercatat sebesar 0,96947804 kali/pelanggan/tahun, yang juga masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan, yaitu 3,2 kali/pelanggan/tahun. Hal ini disebabkan oleh rendahnya jumlah pelanggan yang mengalami padam serta rendahnya frekuensi padam pada masing-masing pelanggan. Hal ini juga menunjukkan bahwa frekuensi pemadaman listrik per pelanggan di Banda Aceh masih dalam batas yang dapat diterima. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa indeks keandalan pada penyulang Banda Aceh secara keseluruhan memenuhi standar yang tercantum dalam SPLN 68-2 : 1986, mencerminkan kualitas penyediaan layanan listrik yang baik dan andal.

Berikut ini grafik perbandingan nilai indeks keandalan SAIDI dan SAIFI pada penyulang Banda Aceh dengan standar nilai SPLN 68-2 : 1986.



Gambar 4. 5 Grafik perbandingan keandalan SAIDI ,SAIFI dan standar SPLN

Grafik di atas menunjukkan perbandingan antara nilai SAIDI dan SAIFI pada penyulang di Banda Aceh dengan nilai standar yang ditetapkan. Berdasarkan data, nilai SAIDI di Banda Aceh mencapai 21,09, jauh melampaui nilai standar sebesar 0,0877. Begitu juga dengan nilai SAIFI, yang tercatat sebesar 3,2, sedangkan standar hanya 0,969. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi dan durasi gangguan listrik di wilayah tersebut masih sangat tinggi, menandakan bahwa keandalan sistem distribusi listrik belum memenuhi standar yang diharapkan.

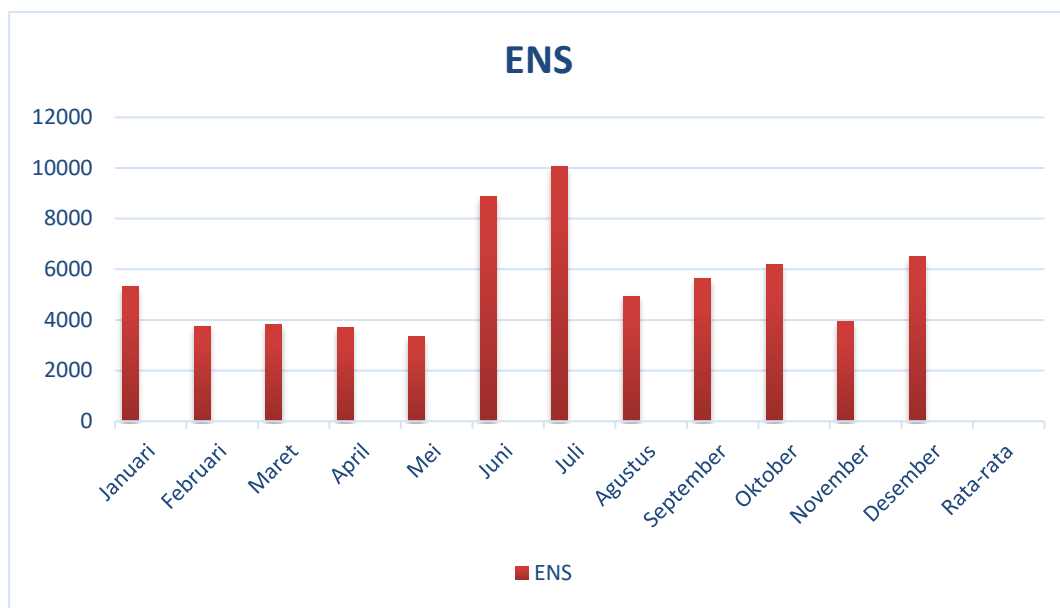
4.2 *Energy Not Supplied (ENS)*

Energy Not Supplied (ENS) merujuk pada jumlah tenaga listrik yang tidak dapat disalurkan sepenuhnya melalui sistem transmisi akibat adanya gangguan, yang menyebabkan transmisi tidak dapat mengirimkan energi listrik ke konsumen. Data ENS sangat krusial untuk dijadikan parameter dalam mengevaluasi keandalan jaringan transmisi energi listrik. Semakin rendah nilai ENS, semakin baik dan andal sistem transmisi dalam memastikan pasokan listrik yang stabil kepada konsumen. Sebaliknya, semakin tinggi nilai ENS, semakin besar pula gangguan yang terjadi dalam sistem transmisi, yang dapat menunjukkan adanya masalah dalam

pengelolaan dan pemeliharaan jaringan. Oleh karena itu, pemantauan ENS menjadi aspek penting dalam upaya meningkatkan kualitas layanan listrik, memastikan pasokan yang lebih efisien, serta mengurangi dampak gangguan terhadap konsumen. Data ENS pada PLN UP3 Banda Aceh Tahun 2022 ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 6 Data ENS

Bulan	ENS
Januari	5314
Februari	3755
Maret	3801
April	3685
Mei	3345
Juni	8872
Juli	10055
Agustus	4940
September	5617
Oktober	6170
November	3932
Desember	6504
Rata-rata	5499,167



Gambar 4. 6 Grafik ENS

Menurut data statistik PLN 2022, rata-rata tarif tenaga listrik di PLN UP3 Banda Aceh sebesar Rp. 1.137 /kWh. Berikut perhitungan rugi-rugi daya PLN UP3 Banda Aceh yang diakibatkan oleh ENS:

$$\begin{aligned}
 \text{Rata-rata Kerugian} &= \text{Rerata ENS} \times \text{Rerata TTL Banda Aceh} \\
 &= 5.499,167 \times 1.137 \\
 &= \text{Rp. 6.252.552}
 \end{aligned}$$

Jadi jumlah kerugian yang diakibatkan oleh ENS yang diterima PLN UP3 Banda Aceh pada tahun 2022 adalah sebesar Rp. 6.252.552

Data ENS (*Energy Not Supplied*) mencerminkan jumlah energi (dalam satuan kWh atau MWh) yang tidak dapat disuplai kepada pelanggan setiap bulannya akibat gangguan pada sistem kelistrikan. Semakin tinggi nilai ENS, semakin besar tingkat gangguan yang terjadi, yang berimplikasi pada peningkatan risiko operasional.

Terdapat fluktuasi signifikan dalam data ENS bulanan, mulai dari nilai terendah sebesar 3.345 kWh pada bulan Mei hingga puncaknya mencapai 10.055 kWh pada bulan Juli. Bulan Juni, Juli, Oktober, dan Desember tercatat memiliki nilai ENS yang melebihi rata-rata bulanan sebesar 5499,17 kWh, menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan.

Klasifikasi Risiko Operasional Berdasarkan ENS

Untuk mengetahui dampak dari gangguan terhadap suplai energi listrik, digunakan indikator Energy Not Supplied (ENS). Nilai ENS dapat digunakan

sebagai dasar dalam mengklasifikasikan tingkat risiko operasional suatu sistem. Semakin besar nilai ENS, maka semakin tinggi pula potensi risiko yang ditimbulkan. Adapun klasifikasi risiko operasional berdasarkan nilai ENS ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4. 7 Klasifikasi Risiko Operasional Berdasarkan ENS

Kategori	Kriteria	Bulan
Rendah	$ENS < 4000$	Februari, Maret, April, Mei, November
Sedang	$4000 \leq ENS < 7000$	Januari, Agustus, September, Oktober, Desember
Tinggi	$ENS \geq 7000$	Juni, Juli

Berdasarkan hasil analisis terhadap data ENS, dapat diidentifikasi tiga tingkat risiko operasional yang berbeda, yaitu risiko tinggi, risiko sedang, dan risiko rendah, yang masing-masing dikaitkan dengan nilai ENS pada bulan-bulan tertentu.

Kategori risiko tinggi tercermin pada bulan Juni dan Juli, yang menunjukkan lonjakan signifikan dalam nilai ENS. Hal ini mengindikasikan adanya gangguan besar yang berpotensi disebabkan oleh kelebihan beban pada jaringan (overloading), kerusakan sistem, atau pemeliharaan yang tidak direncanakan. Untuk memitigasi risiko ini, perlu dilakukan evaluasi mendalam terhadap akar penyebab gangguan, peningkatan kapasitas cadangan sistem, serta pelaksanaan inspeksi dan pemeliharaan preventif secara berkala pada infrastruktur kelistrikan.

Sementara itu, risiko sedang teridentifikasi pada bulan Oktober dan Desember, di mana nilai ENS berada sedikit di atas rata-rata bulanan. Meskipun tidak separah pada bulan Juni dan Juli, kondisi ini tetap memerlukan perhatian. Strategi mitigasi yang direkomendasikan mencakup penjadwalan ulang kegiatan pemeliharaan agar tidak bertepatan dengan periode beban tinggi, serta peningkatan akurasi dalam peramalan beban sistem untuk mengurangi potensi gangguan.

Adapun risiko rendah tercatat pada bulan Mei dan November, dengan nilai ENS yang jauh di bawah rata-rata. Ini menunjukkan kondisi sistem yang relatif stabil dan minim gangguan. Namun demikian, penting untuk terus menjaga standar operasi

yang sudah baik dan mendokumentasikan praktik-praktik terbaik (*best practices*) yang telah diterapkan, agar dapat direplikasi di bulan-bulan lainnya.

4.3 Membuat *Fault Tree Analysis*

4.3.1 Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data, informasi yang digunakan mencakup jumlah gangguan listrik serta faktor-faktor penyebab terjadinya gangguan tersebut. Data ini dikumpulkan secara sistematis selama periode satu tahun penuh, yaitu dari bulan Januari hingga Desember 2022. Dengan mencatat setiap insiden gangguan yang terjadi beserta penyebabnya, proses ini bertujuan untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai pola dan frekuensi gangguan listrik di wilayah Banda Aceh. Data yang terkumpul menjadi dasar penting dalam menganalisis sejauh mana intensitas dan jenis gangguan memengaruhi keandalan sistem kelistrikan di daerah tersebut.

Pemadaman listrik yang terjadi secara tiba-tiba dan tanpa pemberitahuan sebelumnya dapat menimbulkan berbagai dampak negatif bagi masyarakat. Kondisi ini sering kali mengganggu kelancaran aktivitas sehari-hari, baik di lingkungan rumah tangga, dunia usaha, maupun instansi pemerintahan. Ketika pasokan listrik terputus, masyarakat dihadapkan pada berbagai kendala, mulai dari terganggunya pekerjaan, terhambatnya layanan publik, hingga potensi kerugian ekonomi. Oleh karena itu, keberadaan saluran pengaduan yang responsif dan dapat dipercaya menjadi sangat penting agar masyarakat dapat melaporkan insiden pemadaman secara cepat dan tepat. Hal ini juga memungkinkan pihak penyedia layanan listrik untuk menindaklanjuti laporan dengan lebih efisien. Sebagai ilustrasi, berikut ini disajikan data rekapitulasi laporan gangguan berdasarkan jenis gangguan yang terjadi sepanjang tahun 2022 di wilayah Banda Aceh. Data ini diperoleh dari Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Banda Aceh dan memberikan gambaran umum mengenai frekuensi serta karakteristik gangguan listrik yang dialami masyarakat selama periode tersebut.

Tabel 4. 8 Data Gangguan Jaringan Distribusi Listrik Tahun 2022

Bulan	Gangguan Internal					Gangguan Eksternal			
	In-1	In-2	In-3	In-4	In-5	Ek-1	Ek-2	Ek-3	Ek-4
Januari	-	2	1	-	-	-	3	9	3
Februari	1	-	-	-	1	1	4	5	4
Maret	2	1	2	1	-	-	4	6	1
April	3	1	2	1	-	-	5	8	1
Mei	-	-	-	-	1	2	4	5	2
Juni	1	3	-	2	-	2	5	6	2
Juli	-	2	1	-	-	-	6	8	2
Agustus	2	-	1	2	-	2	4	8	7
September	1	-		2	-	1	4	9	7
Oktober	2	-	-	1	-	3	2	7	-
November	2	-	-	1	1	-	3	6	-
Desember	1	1	1	-	1	-	5	4	1
Jumlah	15	10	8	10	4	11	44	69	30

Keterangan :

In-1 : Komponen JTM

In-2 : Peralatan JTR

In-3 : Gardu Induk

In-4 : Trafo

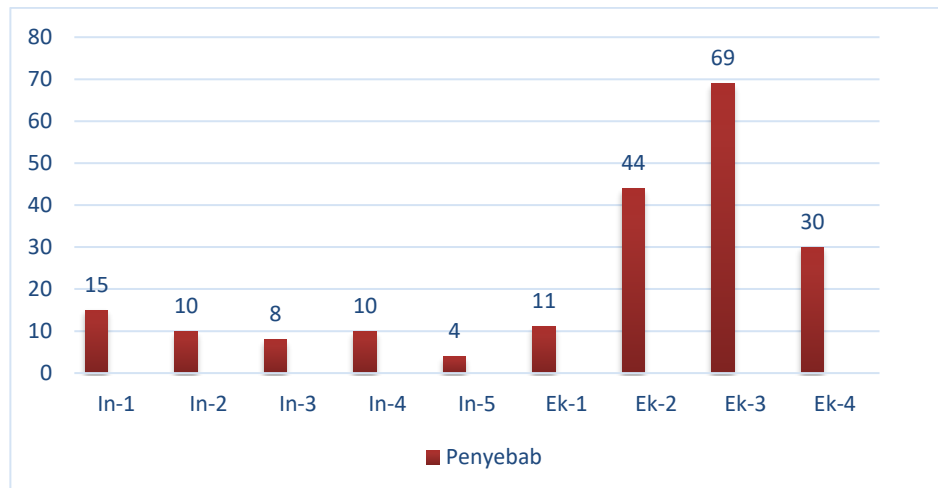
In-5 : Tiang

Ek-1 : Pohon

Ek-2 : Bencana Alam

Ek-3 : Binatang / Pekerjaan pihak III

Ek-4 : Layang-layang / Umbul-umbul dll



Gambar 4. 7 Gangguan Jaringan Distribusi Listrik Tahun 2022

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Tabel 4.8 dapat diketahui bahwa dari sisi internal, penyebab utama kegagalan distribusi listrik berasal dari gangguan pada komponen Jaringan Tegangan Menengah (JTM), yang mencatatkan rata-rata tingkat kegagalan tertinggi yaitu 15 kegagalan dibandingkan komponen lainnya. Sementara itu, jika dilihat dari faktor eksternal, gangguan distribusi paling sering terjadi akibat intervensi dari luar, seperti aktivitas hewan liar atau pekerjaan yang dilakukan oleh pihak ketiga yang mencapai 69 kegagalan dan menjadi penyebab kegagalan terbanyak di sekitar jaringan distribusi.

4.3.2 Identifikasi Penyebab dan Akibat Gangguan Jaringan Listrik

Tabel 4.8 menyajikan hasil identifikasi mengenai bagian-bagian terjadinya gangguan pada jaringan distribusi listrik di wilayah kerja PLN UP3 Banda Aceh. Data tersebut diperoleh dari dokumentasi atau arsip gangguan yang tercatat sepanjang tahun 2022.

Tabel 4. 9 Data Penyebab dan Akibat Gangguan Jaringan Listrik

Letak Kerusakan	Komponen Rusak	Penyebab Kerusakan	Akibat Kerusakan
Jaringan Tegangan Menengah (JTM)	Load Break Switch	Kesalahan pemasangan instalasi	Pengaturan pemindahan arus tidak berfungsi
	Tiang listrik	Gangguan pada	Tiang listrik

Letak Kerusakan	Komponen Rusak	Penyebab Kerusakan	Akibat Kerusakan
		Manusia	roboh
		Gangguan pada Alam	
	Kabel listrik	Gangguan pada Alam	Kabel listrik putus akibat pepohonan, layang-layang, angin, dan sebagainya
		Gangguan pada Binatang	
		Gangguan pada Manusia	
		Kesalahan instalasi	
		Gangguan Komponen	
	Isolator	Gangguan komponen	Tegangan terlalu tinggi membuat isolator menjadi panas hingga pecah
Jaringan Tegangan Rendah (JTR)	Relay	Gangguan komponen	Kontak relay hangus dan lemah sehingga tidak bersentuhan dengan baik
	Konektor	Kesalahan instalasi	Konektor tidak stabil
	Jumper tegangan	Gangguan pada alam	Jumper terlalu renggang hingga putus
Gardu Induk	Saklar Pemisah	Kesalahan	Komponen

Letak Kerusakan	Komponen Rusak	Penyebab Kerusakan	Akibat Kerusakan
	(PMS)	Instalasi	Kendor
	Saklar Pemutus Tenaga (PMT)	Kesalahan Instalasi	Komponen Tidak terikat kencang
Trafo	Jumper Trafo	Gangguan Komponen	Jumper trafo putus

Berdasarkan hasil analisis terhadap Tabel 4.8 , diketahui bahwa gangguan pada jaringan distribusi listrik terjadi di berbagai titik kerusakan yang tersebar di beberapa bagian sistem distribusi. Sistem distribusi listrik sendiri terbagi menjadi empat sektor utama, yaitu Jaringan Tegangan Rendah (JTR), Jaringan Tegangan Menengah (JTM), Gardu Induk atau pembangkit, serta trafo distribusi. Gangguan yang menyebabkan kerusakan pada komponen-komponen ini dapat berasal dari berbagai faktor, baik teknis maupun non-teknis. Faktor teknis mencakup kerusakan pada peralatan listrik itu sendiri serta kesalahan dalam proses instalasi. Sementara itu, faktor eksternal meliputi gangguan yang disebabkan oleh kondisi alam seperti cuaca ekstrem, gangguan dari hewan, maupun aktivitas manusia seperti pekerjaan pihak ketiga yang tidak disengaja namun berdampak pada jaringan distribusi.

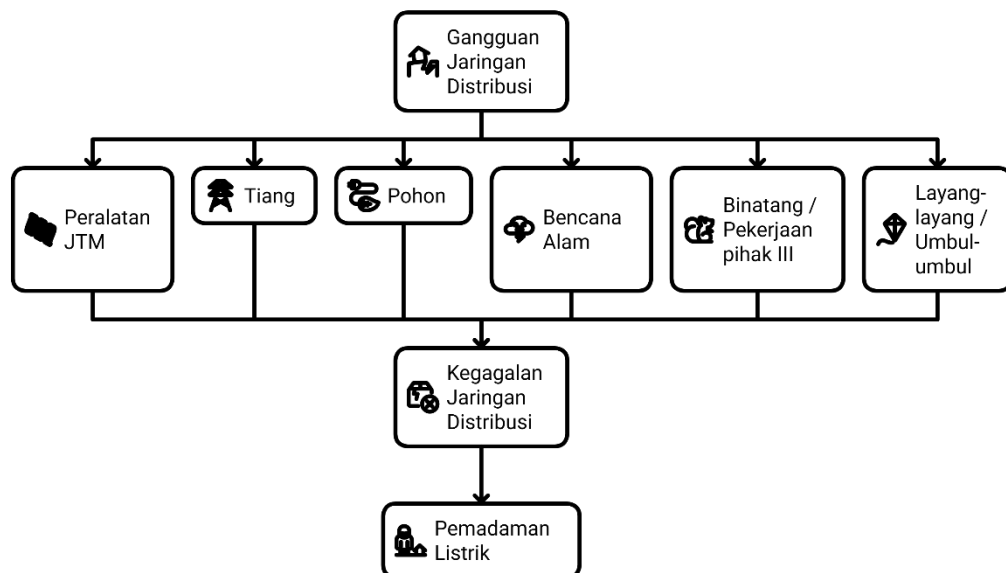
4.3.3 Membuat *Fault Tree Analysis*

Identifikasi terhadap lokasi gangguan pada jaringan distribusi listrik dilakukan dengan meninjau seluruh komponen yang membentuk sistem distribusi. Secara umum, gangguan jaringan dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu gangguan internal dan gangguan eksternal. Sumber data mengenai penyebab terjadinya gangguan ini berasal dari arsip dokumentasi serta hasil observasi lapangan yang dilakukan oleh tim dari UP3 Banda Aceh. Informasi lebih lanjut mengenai faktor penyebab gangguan jaringan di wilayah UP3 Banda Aceh disajikan dalam Gambar 4.9.

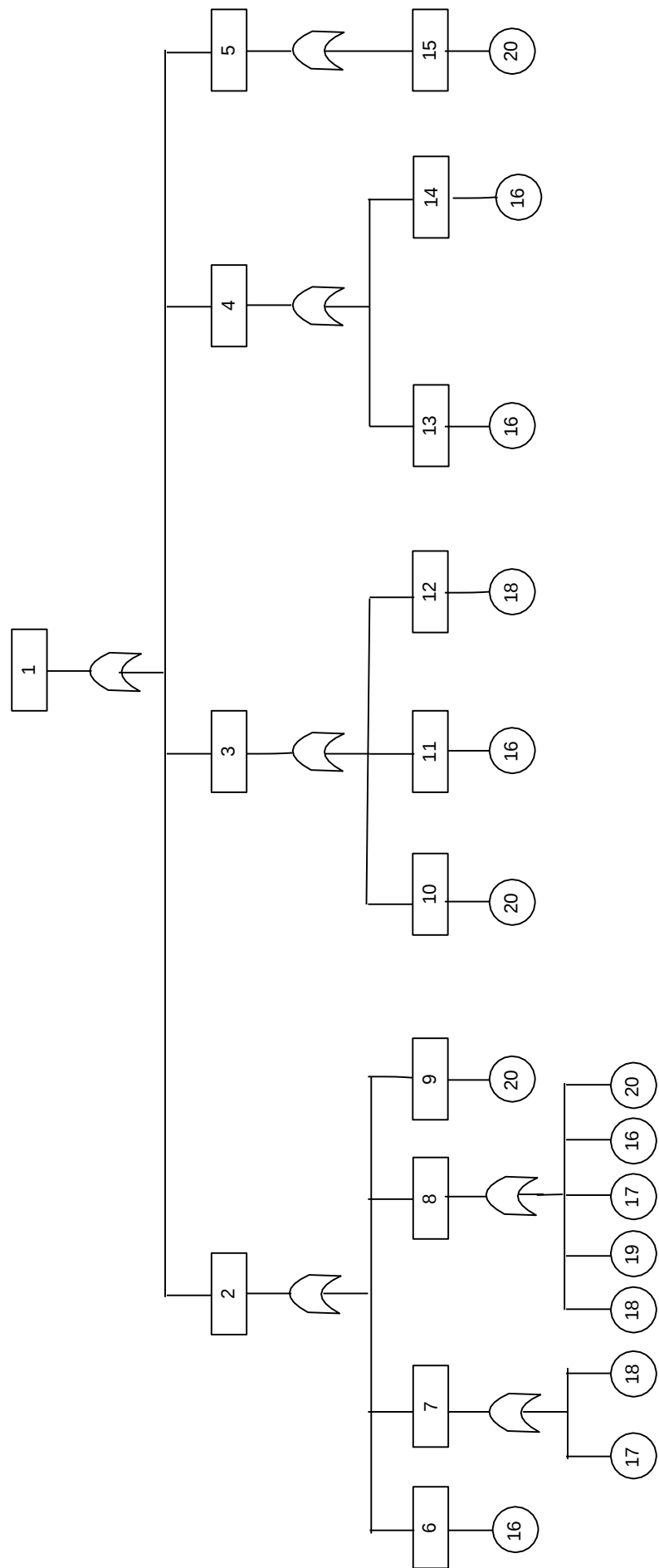
Kerusakan pada jaringan distribusi listrik umumnya disebabkan oleh kerusakan peralatan serta komponen yang berperan dalam proses instalasi dan

penyaluran daya listrik ke konsumen. Gangguan dari sisi internal mencakup kerusakan pada gardu induk, Jaringan Tegangan Menengah (JTM), Load Break Switch (LBS), Sekring Putus (FCO) dan isolator. Sementara itu, gangguan eksternal biasanya timbul akibat faktor lingkungan seperti kondisi alam, gangguan dari hewan, aktivitas manusia, kualitas material instalasi yang buruk, serta kesalahan dalam proses pemasangan jaringan.

Setelah seluruh titik kerusakan pada jaringan distribusi berhasil diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menyusun diagram *Fault Tree* atau pohon kesalahan. Diagram ini dibuat dengan memanfaatkan simbol-simbol logika Boolean, guna mempermudah analisis akar penyebab gangguan secara sistematis dan terstruktur.



Gambar 4. 8 Penyebab Terjadinya Gangguan Jaringan Distribusi Listrik



Gambar 4. 9 Hasil Fault Tree dari Gangguan Jaringan Distribusi Listrik

Tabel 4. 10 Deskripsi Huruf dan angka fault tree

No	Keterangan
1	Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik
2	Jaringan Tegangan Menengah (JTM)
3	Jaringan Tegangan Rendah (JTR)
4	Gardu Induk
5	Trafo
6	Load Break Switch
7	Tiang listrik
8	Kabel listrik
9	Isolator
10	Relay
11	Konektor
12	Jumper Tegangan
13	Saklar Pemisah (PMS)
14	Saklar Pemutus Tenaga (PMT)
15	Jumper Trafo
16	Kesalahan Pemasangan Instalasi
17	Gangguan pada manusia
18	Gangguan Pada Alam
19	Gangguan Pada Binatang
20	Gangguan Komponen

Penentuan *Minimal Cut Set* merupakan proses untuk mengidentifikasi sekumpulan basic event atau kejadian dasar yang memiliki kontribusi langsung terhadap terjadinya suatu kegagalan dalam sistem, dan oleh karena itu memerlukan tindakan perbaikan. *Minimal Cut Set* diperoleh melalui analisis *Fault Tree* (pohon kesalahan), sebagaimana dijelaskan oleh Blanchard (20/ 04).

Dalam proses ini, salah satu tujuan utama adalah mengenali kejadian paling krusial atau *Top Level Event*, yaitu kejadian utama yang mencerminkan kegagalan sistem secara keseluruhan. Setelah pohon kesalahan disusun dan disederhanakan, langkah selanjutnya adalah menghitung probabilitas terjadinya *Top Level Event*.

Tahap ini melibatkan perhitungan terhadap seluruh probabilitas dari kejadian dasar yang terlibat, serta hubungan logika antar kejadian tersebut, seperti logika AND dan OR.

Informasi ini penting untuk membantu dalam menentukan prioritas tindakan perbaikan, berdasarkan pada pengaruh dan kemungkinan terjadinya setiap komponen penyebab kegagalan. Berikut ini adalah penjabaran mengenai cara menentukan *Top Level Event* dari kasus gangguan pada jaringan distribusi listrik menggunakan pendekatan *Fault Tree Analysis*.

$$= 1$$

$$= 2+3+4+5$$

$$= (6+7+8+9) + (10+11+12) + (13+14) + (15)$$

$$= \{(16+17+18+18+19+20+16+21+21)\} + \{(21+16+18)\} + \{(16+16)\} + \{(21)\}$$

Dari penentuan minimal *cut set*, diperoleh *basic event* yang dapat menyebabkan adanya gangguan jaringan transmisi distribusi listrik adalah:

1. Nomor 16 = Kesalahan Pemasangan Instalasi
2. Nomor 17 = Gangguan Manusia
3. Nomor 18 = Gangguan Alam
4. Nomor 19 = Gangguan Binatang
5. Nomor 20 = Gangguan Komponen Listrik

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *Cut Set*, ditemukan lima kejadian dasar yang berkontribusi terhadap terjadinya gangguan pada jaringan distribusi listrik, yaitu gangguan akibat faktor alam, hewan, aktivitas manusia, kesalahan dalam pemasangan instalasi serta kerusakan pada komponen listrik. Analisis terhadap faktor-faktor penyebab serta dampak yang ditimbulkan diperoleh melalui perhitungan *Cut Set*, yang merepresentasikan kejadian dasar penyebab gangguan, dengan mengacu pada data gangguan jaringan yang diperoleh dari UP3 Banda Aceh.

Tabel 4. 11 Faktor Penyebab dan Dampak Ditimbulkan Gangguan Jaringan

Faktor Penyebab	Penyebab Terjadinya Gangguan	Dampak Yang Di Timbulkan
Lingkungan	Alam	Gangguan pada jaringan distribusi listrik yang disebabkan oleh faktor alam, seperti angin kencang, badai, sambaran petir, hujan deras, serta tanah longsor, dapat menimbulkan berbagai bentuk kerusakan fisik pada infrastruktur kelistrikan. Dampak yang umum terjadi meliputi putusnya kabel, kerusakan pada tiang listrik, gangguan pada sistem penangkal petir, hingga kerusakan pada konektor dan sambungan jaringan. Kondisi ini tidak hanya mengganggu kontinuitas pasokan listrik, tetapi juga meningkatkan risiko bahaya keselamatan bagi masyarakat dan memperbesar biaya perbaikan serta pemeliharaan sistem distribusi.
	Binatang	Gangguan pada jaringan distribusi listrik yang disebabkan oleh hewan liar, seperti burung, kelelawar, ular, kukang, tupai, dan sejenisnya, merupakan salah satu penyebab terganggunya kontinuitas pasokan listrik. Hewan-hewan ini sering kali melakukan aktivitas di sekitar atau langsung di atas kabel listrik, baik dengan hinggap, bergelantungan, maupun merayap di sepanjang kabel. Dalam banyak kasus, hewan tersebut tersangkut atau mati akibat sengatan listrik, yang kemudian menyebabkan gangguan pada penghantar bertegangan. Kondisi ini dapat mengakibatkan hubungan singkat (short circuit), gangguan sistem proteksi, hingga pemadaman

Faktor Penyebab	Penyebab Terjadinya Gangguan	Dampak Yang Di Timbulkan
		listrik secara lokal atau meluas, tergantung tingkat keparahan gangguan.
Manusia	Perbuatan Manusia	Gangguan pada jaringan distribusi listrik yang berasal dari aktivitas manusia merupakan salah satu penyebab umum kerusakan infrastruktur kelistrikan. Berbagai kegiatan seperti bermain layang-layang, pemasangan umbul-umbul, pencurian meteran listrik, serta pekerjaan penggalian saluran PDAM berpotensi menimbulkan gangguan terhadap jaringan distribusi. Selain itu, gangguan juga dapat disebabkan oleh pihak ketiga, misalnya kesalahan teknis dalam penanganan instalasi seperti pencabutan kabel jaringan internet (WiFi) yang tersambung secara tidak tepat ke kabel listrik milik PT PLN. Aktivitas-aktivitas tersebut dapat merusak sistem kelistrikan, mengganggu kontinuitas suplai energi, serta meningkatkan risiko keselamatan.
Bahan Material Komponen	Kegagalan pemasangan instalasi (Internal Perusahaan)	Kegagalan dalam pemasangan instalasi umumnya disebabkan oleh pelaksanaan pekerjaan yang tidak sesuai dengan prosedur standar yang telah ditetapkan. Selain itu, penggunaan atau penyambungan komponen yang tidak terpasang dengan kuat dan benar antar bagiannya dapat menimbulkan kelemahan pada sistem, yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada jaringan distribusi listrik secara keseluruhan. Kesalahan ini tidak hanya mengganggu keandalan sistem, tetapi juga meningkatkan risiko gangguan teknis di masa

Faktor Penyebab	Penyebab Terjadinya Gangguan	Dampak Yang Di Timbulkan
		mendatang.
	Kondisi dan Umur Material	Gangguan pada komponen material umumnya disebabkan oleh kondisi bahan yang sudah menua atau mengalami penurunan kualitas seiring waktu. Material yang telah lama digunakan cenderung menjadi rapuh, keropos, aus, mudah patah, atau bahkan putus. Selain itu, penggunaan komponen dengan mutu yang rendah dalam sistem distribusi listrik juga menjadi faktor penyebab terganggunya aliran listrik. Kualitas material yang tidak memadai dapat memperbesar risiko terjadinya gangguan dalam proses pendistribusian energi listrik secara keseluruhan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diuraikan dari hasil penelitian yang sudah dilakukan:

1. Nilai indeks keandalan SAIDI pada penyulang Banda Aceh masih memenuhi standar yang ditetapkan, dengan hasil sebesar 0,087774693 jam/pelanggan/tahun, Hal ini disebabkan oleh rendahnya durasi padam yang dialami oleh masing-masing pelanggan Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan batas maksimum yang diizinkan oleh standar SPLN, yaitu 21,09 jam/pelanggan/tahun, yang menunjukkan bahwa tingkat keandalan penyulang Banda Aceh sangat baik. Sementara itu, nilai SAIFI pada penyulang Banda Aceh tercatat sebesar 0,96947804 kali/pelanggan/tahun, Hal ini disebabkan oleh rendahnya jumlah pelanggan yang mengalami padam serta rendahnya frekuensi padam pada masing-masing pelanggan yang juga masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan, yaitu 3,2 kali/pelanggan/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi pemadaman listrik per pelanggan di Banda Aceh masih dalam batas yang dapat diterima. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa indeks keandalan pada penyulang Banda Aceh secara keseluruhan memenuhi standar yang tercantum dalam SPLN 68-2 : 1986, mencerminkan kualitas penyediaan layanan listrik yang baik dan andal.

2. Kejadian dasar yang menyebabkan kegagalan jaringan distribusi yang disebabkan oleh kerusakan jaringan distribusi ada lima yaitu: gangguan alam, gangguan manusia, gangguan Binatang, gangguan komponen, dan kesalahan instalasi jaringan listrik.

Penyebab utama kerusakan jaringan distribusi listrik ada beberapa yaitu: kerusakan tiang listrik, kabel listrik, konektor, relay isolator, transformator saklar PMT dan PMS.

Prioritas utama perbaikan yang harus dilakukan oleh pihak PT PLN (Persero) berdasarkan pertimbangan efek kerusakan yang di timbulkan, dan frekuensi kerusakan, sebagai berikut: kesalahan instalasi jaringan, gangguan komponen, gangguan pada binatang, gangguan pada manusia, dan gangguan alam.

Analisis terhadap data ENS menunjukkan adanya variasi tingkat risiko operasional pada sistem kelistrikan sepanjang tahun. Risiko tinggi terjadi pada bulan Juni dan Juli, yang menandakan adanya gangguan serius akibat beban berlebih, kerusakan, atau pemeliharaan yang tidak direncanakan, sehingga memerlukan langkah mitigasi yang menyeluruh. Risiko sedang muncul pada bulan Oktober dan Desember, yang meskipun tidak separah risiko tinggi, tetap memerlukan perhatian melalui penjadwalan pemeliharaan yang lebih cermat dan perbaikan dalam peramalan beban. Sementara itu, risiko rendah tercatat pada bulan Mei dan November, yang menunjukkan kondisi sistem yang stabil. Meskipun demikian, upaya menjaga kinerja dan mendokumentasikan praktik terbaik tetap penting untuk mempertahankan dan mereplikasi keberhasilan tersebut di bulan-bulan lainnya.

5.2 Saran

1. Penelitian ini menghitung indeks keandalan sistem menggunakan dua parameter, yaitu SAIFI dan SAIDI. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar mempertimbangkan lebih banyak parameter guna memperoleh hasil yang lebih akurat. Temuan dari penelitian ini menegaskan pentingnya peningkatan keandalan sistem guna meminimalkan jumlah energi yang tidak tersalurkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anugerah, Y., Ambabunga, M., & Masiku, H. (2021). Kerusakan Isolator Saluran Transmisi Tegangan Tinggi Akibat Pengaruh Polutan (Kondisi Kering dan Basah). *Kerusakan Isolator Saluran Transmisi Tegangan Tinggi Akibat Pengaruh Polutan (Kondisi Kering Dan Basah)*, 6(2), 6.
- Dalimunte, M. A. H., Sam, J. F., Syahrudin, M., Listrik, T., Elektro, T., & Medan, P. N. (2023). *DAMPAK INDEKS SAIDI DAN SAIFI TERHADAP KEANDALAN*. 1(1), 9.
- Deri, A. (2023). Distribusi Tenaga Listrik. *Distribusi Tenaga Listrik*, 3(1), 16.
- Desember, J., Aryanto, T., Sunardiyo, S., & Proteksi, A. P. S. (2013). Frekuensi Gangguan Terhadap Kinerja Sistem Proteksi di Gardu Induk 150 KV Jepara. *Frekuensi Gangguan Terhadap Kinerja Sistem Proteksi Di Gardu Induk 150 KV Jepara*, 5(2), 9.
- Duyo, R. A. (2020). ANALISIS PENYEBAB GANGGUAN JARINGAN PADA DISTRIBUSI LISTRIK MENGGUNAKAN METODE FAULT TREE ANALYSIS DI PT. PLN (PERSERO) RAYON DAYA MAKASSAR Rizal. *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, 12(2), 12. <https://doi.org/10.33087/jepca.v6i2.106>
- Elvy, Pasaribu, F. I., Arfianda, M., Studi, P., Elektro, T., Muhammadiyah, U., Utara, S., Studi, P., Elektro, T., Muhammadiyah, U., Utara, S., Elektro, J. T., Islam, U., Utara, S., Studi, P., Elektro, T., Muhammadiyah, U., Utara, S., Buchollz, R., ... Science, H. (2015). *Rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya pada gardu induk*. 8.
- Hermawan, Y., & Masri. (2023). *ANALISIS PEMASANGAN TRAFO SISIPAN TERHADAP PERBAIKAN JATUH TEGANGAN DI PENYULANG LAMHOTMA Oleh: 12(2)*, 8.
- Hidayat, L. I., Sultan, A. R., Achmad, A., Elektro, J. T., Negeri, P., & Pandang, U. (2022). *Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV ULP Sungguminasa Penyulang Pallangga Menggunakan Metode Section Technique dan Reliability Index Assessment (RIA)*. 1(2), 10.
- Hutauruk, S., Sihombing, R., Purba, D., & Richardo, S. (2024). Analisis gangguan listrik melalui kualitas dan pemasangan kabel listrik. *Analisis Gangguan*

- Listrik Melalui Kualitas Dan Pemasangan Kabel Listrik*, 5(2), 5.
- Intang, A., & Pamoga, M. (2023). ANALISIS KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI 20 KV PADA GARDU INDUK SUNGAI JUARO. *ANALISA KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI 20 KV PADA GARDU INDUK SUNGAI JUARO*, 10(2), 13.
- Kunang, S. O., & Zuhriyadi, I. (2017). Sistem Informasi Geografis Jaringan Distribusi dan Gardu Induk PLN di Kota Palembang. *Prosiding Semnastek*, 2(1), 8.
- Kusumo, B. (2023). Analisis Terjadinya Gagal Trip Penyulang Kaca Piring Pada Sistem Kubikel 20 Kv Gardu Induk Kebon Jeruk. *Analisis Terjadinya Gagal Trip Penyulang Kaca Piring Pada Sistem Kubikel 20 Kv Gardu Induk Kebon Jeruk*, 2(3), 19.
- Latupeirissa, H. L. (2018). *ANALISA UMUR PAKAI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 KV DI PT. PLN CABANG AMBON*. 7(2), 126–132.
- Makruf, A., Ilham, R., Sakti, B., Syam, E., Akbar, M., & Yudistira, Y. (2022). Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 Kv dari Gi Tengkwang Pada Penyulang T4. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 22(2), 155–160. <https://doi.org/10.23917/emitor.v22i2.16770>
- Muhammad Aminudin, & Sutarno. (2017). Simulator Sistem Tenaga Listrik Tiga Fasa Double Feeders Untuk Pendidikan Dan Pelatihan. *Edu Elekrika Journal*, 6(2), 6.
- Nugroho, A. J. (2017). Evaluasi Gangguan Jaringan Telepon dengan Kombinasi Metode Fault Tree Analysis dan Failure Mode And Effect Analysis. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 16(2), 12. <https://doi.org/10.23917/jiti.v16i2.2420>
- Pasaribu, F. I., Roza, I., Siregar, C., & Sitompul, F. A. (2021). ANALISA PROTEKSI OVER CURRENT RELAY PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20kV DI PELINDO 1 CABANG BELAWAN. *Repository.Umsu.Ac.Id*, 4(1), 9. <http://repository.umsu.ac.id/handle/123456789/14738>
- Saiful Mangnggenre, Mulyadi, A. P. (2017). *IMPLEMENTASI METODE FAULT TREE ANALYSIS UNTUK ANALISIS KECACATAN PRODUK*. 1(1), 10.
- Sugiana, M. A., Hunaini, F., Muksim, M., Elektro, T., Widyagama, U., Gangguan,

- L., Impedansi, M., & Takagi, M. (2020). *SOFTWARE UNTUK PENENTUAN LOKASI GANGGUAN*. 1(1), 11.
- Sujatmiko, H. (2009). *ANALISIS KERUGIAN DAYA PADA SALURAN TRANSMISI TEGANGAN EKSTRA TINGGI 500 KV DI P . T . PLN (Persero) PENYALURAN & PUSAT PENGATURAN BEBAN (P3B) JAWA BALI REGIONAL JAWA TENGAH & DIY UNIT PELAYANAN TRANSMISI SEMARANG*. 1(1), 20.
- Tahalele, T. J., & Yesaya, M. C. (2024). Analisis Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Untuk Memperbaiki Jatuh Tegangan Gardu Distribusi Passo. *Analisis Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Untuk Memperbaiki Jatuh Tegangan Gardu Distribusi Passo*, 1(3), 3. <https://doi.org/10.31957/jfp.v3i1.160>
- Varian, S. J., & Sulisty, L. (2024). Pemeliharaan Pemisah (PMS) 150 KV di Gardu Induk 150 KV Wonogiri. *Pemeliharaan Pemisah (PMS) 150 KV Di Gardu Induk 150 KV Wonogiri*, 4(1), 7. <https://doi.org/10.24176/elkon.v4i1.11905>
- Vaswani, R., & Kusuma, R. A. (2022). Analisa Jaringan Distribusi Tegangan Menengah Dengan Sistem Single Wire Earth Return Untuk Wilayah Tertinggal, Terdepan Dan Terluar. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 7(1), 9. <https://doi.org/10.52447/jkte.v7i1.5888>
- Wasahua, S., Rikumahu, J. J., & Katanja, A. J. (2021). *ANALISA PENYEBAB GANGGUAN JARINGAN DISTRIBUSI GI SIRIMAU PT PLN. (PERSERO) AREA AMBON MENGGUNAKAN METODE FTA (FAULT TREE ANALISYS)*. 2(2), 16.
- Yetkin, M. E., Kemal, M., Kun, M., & Pamukcu, C. (2024). MethodsX The prediction of the risks of spontaneous combustion in underground coal mines using a fault tree analysis method. *The Prediction of the Risks of Spontaneous Combustion in Underground Coal Mines Using a Fault Tree Analysis Method*, 13(July), 11. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102835>
- Yolnasdi. (2020). *Perencanaan Penempatan Recloser Berdasarkan Gangguan Di Jaringan Distribusi 20 kV Menggunakan ETAP 12.6*. 5(1), 8.

LAMPIRAN

PT. PLN (Persero)

UNIT INDUK

: WILAYAH ACEH

UNIT PELAKSANA PELAYANAN
PELANGGAN

: UP3 BANDA
ACEH

LAPORAN DETIL KODE GANGGUAN SE 004

Januari 2022

KELOMPOK GANGGUAN SE 004

KELOMPOK : Distribusi

SUB : Padam Tidak Terencana

KELOMPOK : Padam Tidak Terencana

FASILITAS : Penyulang

NO.	NO LAPORAN	PENYULANG	JUMLAH PELANGGAN PADAM	LAMA PADAM (JAM)	ENS	JAM X PELANGGAN PADAM
1	J1122010100006	11.GIJTH.F05 / JT5	667	0,07	6	46,69
2	J1122010100011	11.GIULK.F5 / Radar	2.193	0,07	20	153,51
3	J1122010100012	11.PLAL.F03 / PAYA SEUNARA	439	0,53	98	232,67
4	J1122010100013	11.GIJTH.F05 / JT5	1.258	0,02	5	25,16
5	J1122010100020	11.GIBNA.F15 / BA22	1.517	0,08	39	121,36
6	J1122010100023	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,07	4	28,77
7	J1122010200011	11.GIBNA.F22 / BA29	1.945	0,07	20	136,15
8	J1122010200012	11.GIBNA.F08 / BA12	540	0,08	5	43,2

9	J1122010200016	11.GIBNA.F01 / BA2	600	0,08	5	48
10	J1122010200019	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,08	4	52,16
11	J1122010200021	11.GIBNA.F15 / BA22	1.675	0,02	11	33,5
12	J1122010300009	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,03	1	7,29
13	J1122010300015	11.GIBNA.F05 / BA5	280	0,08	4	22,4
14	J1122010300018	11.GIJTH.F01 / SAREE	3.912	0,08	28	312,96
15	J1122010300034	11.GIULK.F5 / Radar	2.193	0,07	20	153,51
16	J1122010400010	11.PLAL.F03 / PAYA SEUNARA	439	0,08	15	35,12
17	J1122010400011	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,08	5	32,88
18	J1122010400023	11.GIBNA.F02 / BA01	4.809	0,2	312	961,8
19	J1122010400024	11.GIBNA.F01 / BA2	641	0,08	12	51,28
20	J1122010500003	11.GIBNA.F08 / BA12	540	0,08	5	43,2
21	J1122010500018	11.GIBNA.F16 / BA24	6.571	0,05	62	328,55
22	J1122010500020	11.GIJTH.F05 / JT5	667	0,42	37	280,14
23	J1122010500030	11.GIBNA.F10 / BA14	1.343	0,07	21	94,01
24	J1122010600001	11.GIBNA.F08 / BA12	540	0,07	5	37,8
25	J1122010600015	11.GIBNA.F01 / BA2	600	0,03	2	18
26	J1122010600026	11.GIBNA.F12 / BA18	2.314	0,07	75	161,98
27	J1122010600027	11.GIBNA.F05 / BA5	280	0,08	4	22,4
28	J1122010600031	11.GIBNA.F05 / BA5	629	0,03	3	18,87
29	J1122010700001	11.GIJTH.F05 / JT5	1.792	0,03	7	53,76
30	J1122010700002	11.GIBNA.F22 / BA29	1.945	0,05	14	97,25
31	J1122010700003	11.GIBNA.F08 / BA12	540	0,08	5	43,2

32	J1122010700004	11.GIJTH.F05 / JT5	667	0,03	3	20,01
33	J1122010700011	11.GIBNA.F01 / BA2	641	0,05	7	32,05
34	J1122010700012	11.GIBNA.F08 / BA12	378	0,05	2	18,9
35	J1122010700016	11.GIBNA.F07 / BA11	5.395	0,07	77	377,65
36	J1122010700021	11.GIULK.F03 / UL06	5.615	0,07	100	393,05
37	J1122010800012	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA			5	32,88
38	J1122010800013	11.GIBNA.F08 / BA12			3	27
39	J1122010800018	11.GIULK.F03 / UL06			100	396,41
40	J1122010800021	11.GIKRY.F05 / KY05			59	367,36
41	J1122010800024	11.GIBNA.F08 / BA12			2	18,9
42	J1122010900014	11.GIJTH.F05 / JT5	1.258	0,03	8	37,74
43	J1122010900015	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,07	4	28,77
44	J1122010900018	11.GIBNA.F05 / BA5	5.650	0,03	29	169,5
45	J1122010900023	11.GIKRY.F05 / KY05	5.248	0,07	59	367,36
46	J1122011000005	11.GIBNA.F21 / BA28	1.860	0,02	11	37,2
47	J1122011000009	11.GIBNA.F16 / BA24	6.571	0,07	85	459,97
48	J1122011000012	11.GIBNA.F13 / BA20	952	0,05	10	47,6
49	J1122011000013	11.GIBNA.F04 / BA4	3.399	0,03	46	101,97
50	J1122011000018	11.GIKRY.F05 / KY05	5.248	0,07	57	367,36
51	J1122011000022	11.GIBNA.F08 / BA12	378	0,07	3	26,46
52	J1122011000029	11.GIJTH.F04 / TANOH ABEE	127	0,08	1	10,16
53	J1122011000032	11.GIBNA.F07 / BA11	5.368	0,08	88	429,44
54	J1122011100006	11.GIJTH.F05 / JT5	667	0,07	6	46,69

55	J1122011100009	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,08	5	32,88
56	J1122011100015	11.PLSRP.F02 / SEURAPUNG	349	0,05	2	17,45
57	J1122011100031	11.GIBNA.F12 / BA18	2.294	0,08	86	183,52
58	J1122011200006	11.GIBNA.F24 / BA31	1.920	0,02	3	38,4
59	J1122011200007	11.GIBNA.F01 / BA2	600	0,03	2	18
60	J1122011200008	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,08	4	52,16
61	J1122011200012	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,08	5	32,88
62	J1122011200016	11.GIBNA.F05 / BA5	5.650	0,02	19	113
63	J1122011200021	11.GIBNA.F08 / BA12	378	0,03	1	11,34
64	J1122011200030	11.GIBNA.F13 / BA20	4.854	0,03	35	145,62
65	J1122011200035	11.PLCA.F01 / BALOHAN	240	0,05	2	12
66	J1122011300012	11.GIBNA.F04 / BA4	3.399	0,02	31	67,98
67	J1122011300014	11.GIBNA.F10 / BA14	1.342	0,05	53	67,1
68	J1122011300018	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,03	1	19,56
69	J1122011300024	11.GIJTH.F05 / JT5	1.258	0,08	21	100,64
70	J1122011300027	11.GIBNA.F01 / BA2	641	0,03	4	19,23
71	J1122011400002	11.GIBNA.F21 / BA28	1.860	0,08	44	148,8
72	J1122011400013	11.GIBNA.F08 / BA12	6.499	0,02	17	129,98
73	J1122011400014	11.GIJTH.F05 / JT5	2.257	0,05	19	112,85
74	J1122011400018	11.GIKRY.F04 / KY04	3.892	0,05	57	194,6
75	J1122011500007	11.GIBNA.F08 / BA12	6.499	0,02	17	129,98
76	J1122011500013	11.GIBNA.F05 / BA5	5.650	0,02	19	113
77	J1122011600001	11.GIJTH.F05 / JT5	5.066	0,07	51	354,62

78	J1122011600011	11.GIULK.F04 / UL07	8.542	0,08	129	683,36
79	J1122011600012	11.GIBNA.F02 / BA01	2.706	0,08	62	216,48
80	J1122011600022	11.GIBNA.F16 / BA24	6.571	0,07	85	459,97
81	J1122011700009	11.GIBNA.F01 / BA2	600	0,07	4	42
82	J1122011700016	11.GIULK.F03 / UL06	5.663	0,05	71	283,15
83	J1122011700025	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,07	3	45,64
84	J1122011700029	11.GIBNA.F14 / BA21	377	0,33	117	124,41
85	J1122011800012	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,08	5	32,88
86	J1122011800013	11.GIULK.F03 / UL06	5.663	0,05	71	283,15
87	J1122011800015	11.GIBNA.F08 / BA12	6.499	0,05	44	324,95
88	J1122011800027	11.GIJTH.F05 / JT5	1.258	0,05	13	62,9
89	J1122011800029	11.GIJTH.F01 / SAREE	255	0,07	2	17,85
90	J1122011800031	11.GIJTH.F05 / JT5	5.066	0,08	58	405,28
91	J1122011800034	11.GIBNA.F16 / BA24	2.710	0,05	30	135,5
92	J1122011800039	11.GIBNA.F15 / BA22	7.291	0,08	175	583,28
93	J1122011900013	11.GIBNA.F15 / BA22	1.667	0,07	36	116,69
94	J1122011900018	11.GIBNA.F08 / BA12	378	0,02	1	7,56
95	J1122011900019	11.GIBNA.F15 / BA22	1.500	0,02	9	30
96	J1122012000001	11.GIBNA.F10 / BA14	1.341	0,08	24	107,28
97	J1122012000008	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,08	4	52,16
98	J1122012000010	11.GIJTH.F05 / JT5	2.257	0,03	11	67,71
99	J1122012000020	11.PLAL.F03 / PAYA SEUNARA	439	0,08	15	35,12
100	J1122012000023	11.GIJTH.F05 / JT5	12.385	0,08	168	990,8

101	J1122012100004	11.GIBNA.F01 / BA2	600	0,08	5	48
102	J1122012100008	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,9	27	218,7
103	J1122012100014	11.GIBNA.F18 / BA25	1.476	0,03	14	44,28
104	J1122012100015	11.GIBNA.F05 / BA5	280	0,05	2	14
105	J1122012100018	11.GIJTH.F05 / JT5	667	0,08	7	53,36
106	J1122012100019	11.GIBNA.F08 / BA12	7.245	0,03	29	217,35
107	J1122012100020	11.GIBNA.F05 / BA5	2	0,03	6	0,06
108	J1122012100021	11.GIBNA.F04 / BA4	3.128	0,22	286	688,16
109	J1122012100021	11.GIBNA.F04 / BA4	1.908	0,22	52	419,76
110	J1122012100029	11.GIJTH.F03 / KOTA JANTHO	2.675	1,02	449	2.728,50
111	J1122012200010	11.GIBNA.F08 / BA12	7.245	0,05	48	362,25
112	J1122012200020	11.PLCA.F01 / BALOHAN	685	0,07	29	47,95
113	J1122012200021	11.GIJTH.F04 / TANO H ABEE	127	0,08	1	10,16
114	J1122012300001	11.GIJTH.F04 / TANO H ABEE	127	0,03		3,81
115	J1122012300004	11.PLAL.F03 / PAYA SEUNARA	439	0,08	15	35,12
116	J1122012300010	11.GIBNA.F10 / BA14	1.342	0,08	84	107,36
117	J1122012300013	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,08	4	52,16
118	J1122012300025	11.GIBNA.F02 / BA01	2.706	0,08	62	216,48
119	J1122012400001	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,25	8	60,75
120	J1122012400003	11.GIJTH.F04 / TANO H ABEE	127	0,05	1	6,35
121	J1122012400013	11.GIBNA.F05 / BA5	280	0,03	1	8,4
122	J1122012400024	11.GIBNA.F25 / BA32	1.374	0,07	23	96,18
123	J1122012400025	11.GIBNA.F21 / BA28	1.860	0,03	17	55,8

124	J1122012500005	11.GIBNA.F03 / BA3	1.680	0,03	58	50,4
125	J1122012500011	11.GIJTH.F04 / TANOH ABEE	1.900	0,05	10	95
126	J1122012500012	11.GIBNA.F05 / BA5	629	0,03	3	18,87
127	J1122012500017	11.GIBNA.F01 / BA2	641	0,08	12	51,28
128	J1122012500018	11.PLAL.F03 / PAYA SEUNARA	439	0,08	15	35,12
129	J1122012500024	11.GIKRY.F04 / KY04	1.301	0,07	31	91,07
130	J1122012500028	11.GIJTH.F05 / JT5	5.066	0,07	51	354,62
131	J1122012500034	11.PLCA.F01 / BALOHAN	240	0,05	2	12
132	J1122012600006	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,05	2	32,6
133	J1122012600010	11.GIBNA.F23 / BA30	3.900	0,07	137	273
134	J1122012600010	11.GIBNA.F23 / BA30	26	0,07	1	1,82
135	J1122012700011	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,03	2	12,33
136	J1122012700014	11.PLLBT.F01 / MERDUATI 2	6.017	0,05	45	300,85
137	J1122012700017	11.GIULK.F03 / UL06	5.663	0,05	70	283,15
138	J1122012700019	11.GIIDI.F05 / IDI-9	170	0,08	3	13,6
139	J1122012700022	11.PLCA.F01 / BALOHAN	685	0,07	29	47,95
140	J1122012700025	11.GIJTH.F01 / SAREE	255	0,07	2	17,85
141	J1122012700035	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,03	1	7,29
142	J1122012800003	11.GIJTH.F01 / SAREE	652	0,07	3	45,64
143	J1122012800004	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,03	1	7,29
144	J1122012800012	11.GIULK.F03 / UL06	5.663	0,05	70	283,15
145	J1122012800013	11.GIBNA.F22 / BA29	1.945	0,08	22	155,6
146	J1122012800015	11.GIBNA.F08 / BA12	540	0,08	5	43,2

147	J1122012800022	11.GIBNA.F02 / BA01	1.162	0,05	16	58,1	
148	J1122012900001	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,03	1	7,29	
149	J1122012900003	11.GIJTH.F02 / LAMTEUBA	411	0,07	4	28,77	
150	J1122012900006	11.GIBNA.F23 / BA30	26	0,08	1	2,08	
151	J1122012900006	11.GIBNA.F23 / BA30	3.900	0,08	157	312	
152	J1122012900011	11.PLCA.F01 / BALOHAN	240	0,08	3	19,2	
153	J1122012900013	11.GIBNA.F05 / BA5	280	0,02	1	5,6	
154	J1122012900020	11.GIBNA.F05 / BA5	629	0,02	2	12,58	
155	J1122012900023	11.GIBNA.F09 / BA13	2.018	0,05	27	100,9	
156	J1122013000003	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,02	1	4,86	
157	J1122013000007	11.GIJTH.F01 / SAREE	255	0,07	2	17,85	
158	J1122013000016	11.GIBNA.F08 / BA12	378	0,07	3	26,46	
159	J1122013000021	11.GIBNA.F01 / BA2	600	0,05	3	30	
160	J1122013100001	11.GIKRY.F05 / KY05	243	0,02	1	4,86	
161	J1122013100014	11.GIBNA.F13 / BA20	4.854	0,08	93	388,32	