

ANALISIS PENYEBAB *LOSSES* DAYA AKIBAT GANGGUAN JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV MENGGUNAKAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* DAN *FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS*

Ahmad Sidik¹, Maryanto Masarrang², Ratih Mar'atus Sholihah³, Alamsyah⁴

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako¹²³⁴
Email: ahmadsidik4437@gmail.com

ABSTRACT

Disturbances in 20 kV medium-voltage distribution networks have a significant impact on increasing power losses and reducing system reliability. This study aims to identify and analyze the causes of power losses resulting from distribution network disturbances by applying Fault Tree Analysis (FTA) and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), supported by simulations using ETAP software. The FTA method is employed to determine the root causes of disturbances through cause-effect relationships within the distribution system, while FMEA is used to evaluate the risk level of each failure mode by calculating the Risk Priority Number (RPN). Furthermore, ETAP simulations are conducted to assess active and reactive power losses as well as voltage profiles before and after technical improvements are implemented. The analysis results indicate that power losses are caused by several factors, including insulator damage, conductor or power cable failures, cable joint defects, distribution transformer issues, environmental disturbances, and protection equipment failures such as fuses and reclosers. Based on the RPN values, components with the highest risk levels are prioritized for corrective actions. ETAP simulation results demonstrate that transformer tap adjustment, conductor cross-section replacement, and capacitor bank installation effectively reduce power losses and improve voltage quality. This study is expected to serve as a reference for enhancing the efficiency and reliability of power distribution systems.

Keywords: power losses, 20 kV distribution network, Fault Tree Analysis, Failure Mode and Effect Analysis, ETAP

INTISARI

Gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV berpengaruh signifikan terhadap meningkatnya *losses* daya serta menurunnya keandalan sistem penyaluran tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis penyebab *losses* daya akibat gangguan pada jaringan distribusi 20 kV dengan menerapkan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), serta didukung oleh simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Metode FTA digunakan untuk menentukan akar permasalahan gangguan berdasarkan keterkaitan sebab dan akibat dalam sistem distribusi, sedangkan FMEA digunakan untuk menilai tingkat risiko setiap mode kegagalan melalui perhitungan Risk Priority Number (RPN). Selanjutnya, simulasi ETAP dilakukan untuk mengevaluasi *losses* daya aktif dan reaktif serta kondisi profil tegangan sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan teknis. Hasil analisis menunjukkan bahwa *losses* daya disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain kerusakan isolator, konduktor atau kabel listrik, sambungan kabel, transformator distribusi, gangguan lingkungan, serta kegagalan peralatan proteksi seperti fuse dan recloser. Berdasarkan nilai RPN, komponen dengan risiko tertinggi diprioritaskan untuk dilakukan perbaikan. Hasil simulasi ETAP membuktikan bahwa pengaturan tap transformator, penggantian penampang kabel, dan pemasangan kapasitor bank mampu mengurangi *losses* daya serta memperbaiki kualitas tegangan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan acuan dalam peningkatan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Kata kunci: *losses* daya, jaringan distribusi 20 kV, Fault Tree Analysis, Failure Mode and Effect Analysis, ETAP.

I. PENDAHULUAN

Listrik adalah salah satu komoditas penting dalam perekonomian Indonesia. Selain digunakan secara luas oleh masyarakat untuk kebutuhan penerangan, listrik juga menjadi sumber energi utama bagi sektor industri. Dalam penyediaannya, terdapat tiga tahap utama dalam pengiriman tenaga listrik, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi, yang dapat dianalogikan sebagai proses produksi, pengangkutan, dan penjualan tenaga listrik. Pembangkitan dilakukan di pusat-pusat tenaga listrik menggunakan generator. Proses transmisi, yaitu penghantaran listrik dalam jumlah besar, memindahkan tenaga dari pusat listrik ke gardu-gardu induk. Dari gardu-gardu induk tersebut, listrik didistribusikan ke gardu distribusi dan kemudian sampai ke konsumen atau pengguna akhir [9].

Gangguan pada jaringan distribusi 20 KV dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti gangguan teknis pada peralatan (misalnya pemutus sirkuit, transformator, dan konduktor), kondisi lingkungan (petir, angin kencang, atau pohon tumbang), serta faktor manusia. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang komprehensif untuk mengidentifikasi dan memahami penyebab utama *losses* daya listrik akibat gangguan pada jaringan distribusi. Salah satu faktor utama yang menyebabkan terjadinya *losses* tegangan adalah gangguan pada jaringan distribusi, baik yang disebabkan oleh faktor teknis maupun non teknis. Gangguan teknis, seperti arus bocor, kerusakan isolator, dan kerusakan pada kabel, dapat menurunkan efisiensi transmisi daya listrik. Di sisi lain, gangguan non-teknis seperti pencurian listrik, atau perawatan yang kurang optimal juga berperan dalam menambah beban *losses* tersebut. Untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengurangi *losses* tersebut, diperlukan pendekatan yang sistematis dan tepat guna.

Salah satu metode yang digunakan dalam analisis kegagalan sistem adalah *Fault Tree Analysis* (FTA) dan *Failure Mode and Effect analysis* (FMEA). Kedua metode ini memiliki pendekatan yang berbeda namun saling melengkapi dalam menganalisa penyebab utama

akar permasalahan gangguan dan dampaknya pada sistem.

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode deduktif yang digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara berbagai kegagalan sistem, mulai dari kegagalan pada komponen individu hingga kegagalan sistem secara keseluruhan. FTA memetakan secara grafis bagaimana berbagai faktor penyebab dapat memicu terjadinya kegagalan sistem, termasuk gangguan pada jaringan distribusi yang berkontribusi terhadap *losses* tegangan [7].

Sedangkan, *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) merupakan metode induktif yang fokus pada identifikasi potensi kegagalan di setiap komponen atau subsistem, serta menilai dampak dari kegagalan tersebut terhadap keseluruhan sistem. Melalui FMEA, berbagai skenario kegagalan dapat diantisipasi dan ditentukan keparahannya, sehingga memungkinkan tindakan preventif dapat dilakukan lebih dini (Ariyanti, 2019).

Untuk meningkatkan keakuratan analisis, perangkat lunak ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) digunakan dalam simulasi dan pemodelan jaringan distribusi 20 kV. ETAP memungkinkan analisis aliran daya, gangguan hubung singkat, serta evaluasi keandalan sistem distribusi dengan pendekatan berbasis data dan simulasi real-time. Dengan memanfaatkan ETAP, penelitian ini akan menghasilkan analisis yang lebih akurat terkait dampak gangguan terhadap *losses* daya listrik serta memberikan rekomendasi teknis untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan distribusi.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab utama *losses* daya listrik akibat gangguan jaringan distribusi 20 kV menggunakan metode FTA dan FMEA, serta melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi listrik dan mengurangi *losses* daya listrik guna mendukung keandalan pasokan listrik yang lebih baik.

II. LANDASAN TEORI

A. Distribusi Listrik

Distribusi listrik adalah bagian penyaluran energi listrik dari gardu induk step down menuju ke pelanggan. Dalam distribusi tenaga listrik dikenal dua jaringan distribusi, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Unit produksi listrik menghasilkan listrik sebesar 11 kV dan 20 kV kemudian tegangan dinaikkan menjadi 150 kV melalui trafo tegangan tinggi yang disalurkan melalui transmisi, tujuan dari menaikkan tegangan menjadi 500 kV adalah untuk mengurangi jumlah daya yang hilang pada saat proses penyaluran ke saluran transmisi, dimana kerugian daya listrik sebanding dengan kuadrat arus yang melewatinya, dengan daya yang sama, nilai arus yang mengalir semakin kecil apabila nilai tegangannya diperbesar, sehingga kerugian daya semakin kecil. Sebelum disalurkan ke pelanggan umum trafo penurun tegangan (*step down*) pada gardu induk distribusi akan menurunkan tegangan yang disalurkan menjadi 20 kV, tegangan ini disalurkan ke trafo distribusi primer terlebih dahulu untuk diturunkan tegangannya menjadi 220/380 V yang merupakan tegangan aman dan cocok untuk peralatan-peralatan listrik [2].

B. Penghantar sistem distribusi

Penghantar sistem distribusi adalah komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengalirkan energi listrik dari gardu distribusi ke pelanggan atau konsumen akhir. Pemilihan penampang penghantar dipengaruhi oleh pertimbangan-pertimbangan antara lain untuk pembebanan kabel yang diperbolehkan tergantung pada kemampuan isolasi untuk melawan kenaikan temperatur, jadi pada temperatur penghantar dan temperatur udara di sekelilingnya, pembebanan saluran udara yang diperbolehkan dibatasi oleh pengurangan kekuatan mekanis bila temperatur bertambah, variasi tegangan yang diperbolehkan adalah $\pm 5\%$.

Penampang penghantar yang besar mengurangi kerugian tetapi menyebabkan harga

menjadi lebih mahal, perbandingan optimum antara harga kerugian dan harga kawat memberikan penampang penghantar ekonomis.

C. Gangguan Pada Jaringan Distribusi

Gangguan adalah faktor penghalang dari suatu sistem yang sedang berjalan atau kondisi dari sistem pendistribusian tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal. Gangguan dalam peralatan listrik didefinisikan sebagai terjadinya kerusakan di dalam jaringan listrik yang menyebabkan aliran arus listrik keluar dari saluran penghantarnya. Sistem distribusi berguna untuk memindahkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar ke konsumen. Fungsi distribusi tenaga listrik adalah membagi atau mendistribusikan tenaga listrik ke beberapa lokasi konsumen. Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang langsung terhubung dengan konsumen, karena pasokan energi ke konsumen dilayani secara langsung melalui jaringan distribusi. Namun, hal ini dapat menemui hambatan bila terjadi gangguan yang tidak diinginkan pada jaringan distribusi [4].

D. Dampak Gangguan Terhadap Kualitas Tegangan.

Permasalahan yang sering terjadi dalam penyaluran energi listrik yaitu, jumlah daya atau energi yang sampai kepada konsumen tidak sesuai dengan jumlah energi yang dikirim oleh PLN, hal ini disebabkan karena adanya susut energi pada pendistribusian. Terdapat dua jenis susut energi listrik dalam penyaluran atau dalam sistem distribusi, yaitu susut teknis dan non teknis. Susut teknis merupakan susut yang disebabkan oleh sifat penghantar dan peralatan listrik itu sendiri dalam keadaan operasi. Susut non-teknis merupakan rugi yang terjadi diakibatkan adanya permasalahan pada penyaluran listrik, susut non-teknis yaitu berupa pencurian listrik, penyambungan listrik secara ilegal, dan kurangnya akurasi pencatatan kWh meter pada pelanggan [6].

E. Fault tree analysis (FTA)

FTA merupakan metode analisis deduktif untuk mengidentifikasi terjadinya kerusakan pada sistem dengan cara menggambarkan alternatif-alternatif kejadian dalam suatu blok diagram secara terstruktur. Analisis deduktif dapat dilakukan pada semua sistem kompleks.

Titik awal analisa FTA adalah pengidentifikasian *mode* kegagalan pada *top level* suatu sistem. Sebuah *fault tree* mengilustrasikan keadaan komponen– komponen sistem (*basic event*) dan hubungan antara *basic event* dan *top event*. menyatakan hubungan tersebut disebut gerbang logika. Dari diagram *fault tree* ini dapat disusun *cut set* dan *minimal cut set*. *Cut set* yaitu serangkaian komponen system, apabila terjadi kegagalan dapat berakibat kegagalan pada sistem. Sedangkan *minimal cut set* yaitu set minimal yang dapat menyebabkan kegagalan pada sistem. FTA menggunakan langkah-langkah terstruktur dalam melakukan analisis pada sistem. Adapun langkah-langkah FTA, yaitu:

1. Mengidentifikasi kejadian/peristiwa terpenting dalam sistem (*top level event*)
Langkah pertama dalam FTA ini merupakan langkah penting karena akan mempengaruhi hasil analisis sistem. Pada tahap ini, dibutuhkan pemahaman tentang sistem dan pengetahuan tentang jenis-jenis kerusakan (*undesired event*) untuk mengidentifikasi akar permasalahan sistem. Pemahaman tentang sistem dilakukan dengan mempelajari semua informasi tentang sistem dan ruang lingkupnya.
2. Membuat pohon kesalahan.
Setelah permasalahan terpenting teridentifikasi, langkah berikutnya adalah menyusun urutan sebab akibat pohon kesalahan. Pada tahap ini, *cause and effect diagram* (Ishikawa) dapat digunakan untuk menganalisis kesalahan dan mengeksplorasi keberadaan kerusakan-kerusakan yang tersembunyi. Pembuatan pohon kesalahan dilakukan dengan menggunakan simbol-simbol *Boolean*. Standarisasi simbol-simbol

tersebut diperlukan untuk komunikasi dan konsistenan pohon kesalahan.

3. Menganalisis pohon kesalahan.

Analisis pohon kesalahan diperlukan untuk memperoleh informasi yang jelas dari suatu sistem dan perbaikan-perbaikan apa yang harus dilakukan pada sistem. Tahap-tahap analisis pohon kesalahan dapat dibedakan menjadi 3, yaitu:

- a. Menyederhanakan pohon kesalahan.
Tahap pertama analisis pohon kesalahan adalah menyederhanakan pohon kesalahan dengan menghilangkan cabang-cabang yang memiliki kemiripan karakteristik. Tujuan penyederhanaan ini adalah untuk mempermudah dalam melakukan analisis sistem lebih lanjut.
- b. Menentukan peluang munculnya kejadian atau peristiwa terpenting dalam sistem (*top level event*).
Setelah pohon kesalahan disederhanakan. tahap berikutnya adalah menentukan peluang kejadian paling penting dalam sistem. Pada langkah ini, peluang semua input dan logika hubungan digunakan sebagai pertimbangan penentuan peluang.
- c. Mereview hasil analisis.
Review hasil analisis dilakukan untuk mengetahui kemungkinan perbaikan yang dapat dilakukan pada sistem.

Output yang diperoleh setelah melakukan FTA adalah peluang munculnya kejadian terpenting dalam sistem dan memperoleh akar permasalahan sebabnya. Akar permasalahan tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh prioritas perbaikan permasalahan yang tepat pada sistem.

F. Failure mode and effect analysis (FMEA)

FMEA merupakan metode analisis induktif untuk mengidentifikasi kerusakan produk dan atau proses yang paling potensial dengan mendeteksi peluang, penyebabnya, efek, dan prioritas

perbaikan berdasarkan tingkat kepentingan kerusakan. Analisis induktif merupakan analisis yang dimulai dari penyebab-penyebab kerusakan dan bagaimana kerusakan bisa terjadi. Metode FMEA akan mendefinisikan segala sesuatu yang rusak dan mengapa kerusakan bisa terjadi (*failure modes*) serta mengetahui efek dari setiap kerusakan pada sistem (*failure effect*).

Metode FMEA dapat digunakan untuk mereview desain produk, proses atau sistem dengan mengidentifikasi kelemahan-kelemahan yang ada dan kemudian menghilangkannya. Beberapa bagian penting yang ada dalam metode FMEA sebagai berikut:

1. *Failure mode* adalah bagian FMEA yang digunakan untuk mengetahui bagaimana suatu sistem dapat mengalami kerusakan.
2. *Failure effect* adalah bagian FMEA yang digunakan untuk mengetahui pengaruh terjadinya kerusakan pada sistem.
3. *Cause of failure* adalah bagian FMEA yang digunakan untuk mengetahui penyebab kerusakan pada sistem.
4. *Risk evaluation* adalah bagian FMEA yang digunakan untuk mengetahui masalah terpenting yang harus diperhatikan dan mendapatkan prioritas penyelesaian.

Tipe-tipe FMEA berdasarkan penggunaannya sebagai berikut:

1. *System FMEA*.

Tipe *FMEA* yang digunakan untuk menganalisis sistem yang terdiri dari berbagai level, mulai dari level komponen dasar sampai dengan level sistem. Pada level terendah, *FMEA* akan mengidentifikasi mengapa suatu komponen bisa mengalami kerusakan dan efek apa yang akan terjadi pada sistem. Penggunaan *system FMEA* secara lengkap lebih difokuskan pada level-level yang penting.

2. *Design FMEA*.

Tipe FMEA dilakukan produk atau jasa pada tahap desain sistem. Tujuan *design*

FMEA adalah untuk menganalisis suatu desain sistem dan mencari kemungkinan pengaruh kerusakan pada sistem. *Design FMEA* akan dapat memberikan solusi dengan memperbaiki desain atau mengurangi pengaruh kerusakan karena pengaruh kerusakan sudah diantisipasi pada tahap desain sistem.

3. *Process FMEA*.

Process FMEA dilakukan pada proses manufaktur dengan menampilkan kemungkinan kerusakan, keterbatasan peralatan, perlunya pelatihan bagi operator dan sumber-sumber penyebab kerusakan. Informasi-informasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan tindakan korektif jika terjadi kerusakan proses.

4. *Functional FMEA*.

Functional FMEA dikenal dengan nama *black box FMEA* dan lebih difokuskan terhadap fungsi atau penggunaan suatu komponen atau subsistem dalam suatu sistem, jadi *functional FMEA* akan lebih terfokus lagi ke dalam subsistem tertentu sehingga akan lebih spesifik dalam analisisnya.

G. Program aplikasi ETAP

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah Software sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real sebelum sebuah sistem direalisasikan. Software ETAP (Electric Transient and Analysis Program) 19 merupakan salah satu Software aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik. Software ETAP (Electric Transient and Analysis Program) 19 mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, dan online untuk pengolahan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkit tenaga

listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan Software ETAP (Electric Transient and Analysis Program) 19 antara lain : analisa aliran daya, analisa hubung singkat, starting motor, koordinasi relay proteksi, analisa kestabilan transien, dan lain-lain. Dalam menganalisa sistem tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (Single line diagram) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor.

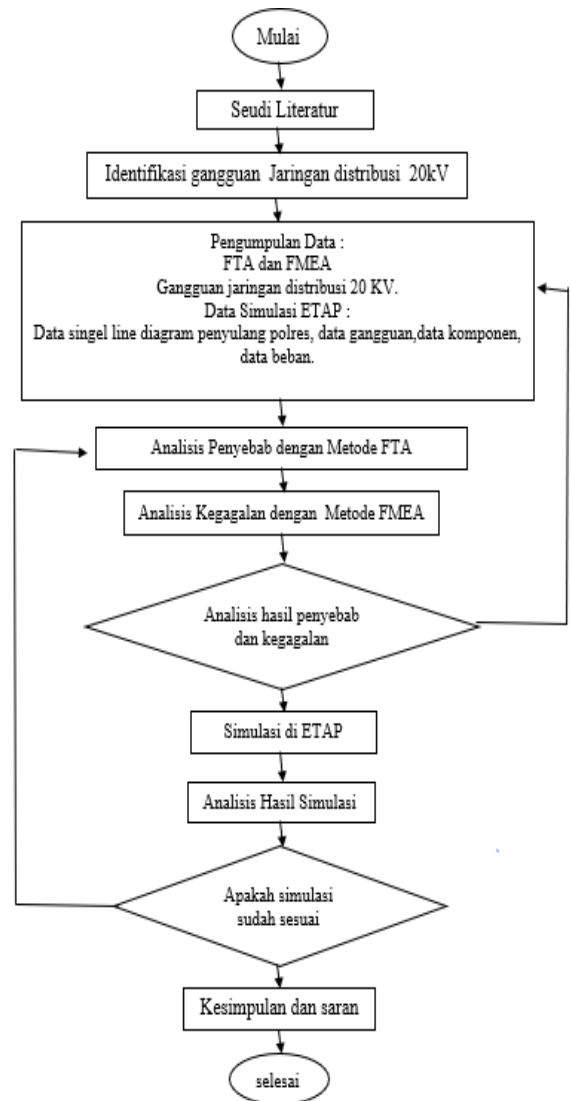
H. Elemen dalam software ETAP

Suatu sistem tenaga terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung, maka data-data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain :

1. Data Power Grid
2. Data Transformator (kV, MVA, Z, X/R)
3. Data kabel Penghantar (Panjang, R, X, Y)
4. Data Bus

III. METODE PENELITIAN

A. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Pohon kesalahan

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

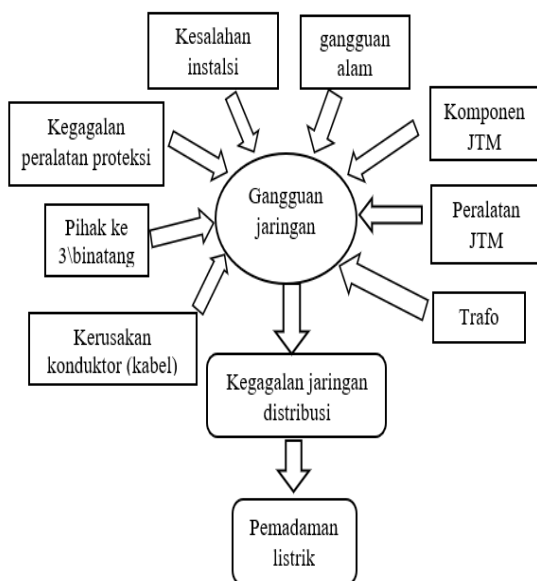
A. Tahap FTA (Fault Tree Analysis)

FTA adalah salah satu *tool* yang dapat digunakan untuk menelusuri kerusakan dengan mengetahui kejadian atau kombinasi kejadian dalam gangguan sistem jaringan distribusi listrik, berikut langkah-langkah yang digunakan dalam FTA, seperti dijelaskan di bawah ini.

1. Identifikasi Kesalahan (*Undisiret Event*) Dalam Sistem.

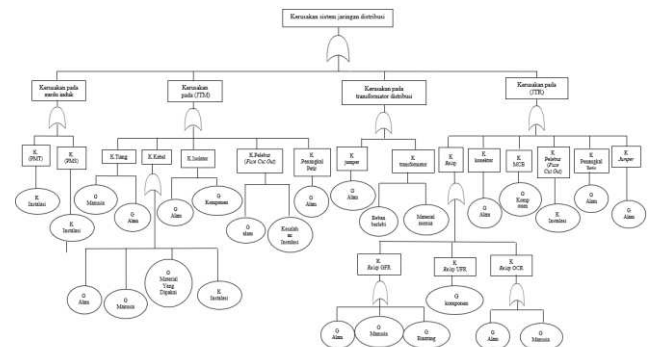
Tahap awal dalam mengidentifikasi kesalahan pada sistem distribusi listrik dimulai dengan memahami kondisi awal jaringan. Sistem distribusi listrik berawal dari gardu induk yang berfungsi sebagai pusat penyaluran daya listrik untuk suatu wilayah pelanggan tertentu. Besarnya beban listrik pada gardu induk akan selalu berubah-ubah mengikuti kebutuhan pelanggan setiap saat. Dari gardu induk, energi listrik disalurkan ke jaringan tegangan menengah (JTM). Sebelum masuk ke jaringan tegangan rendah, tegangan listrik diturunkan terlebih dahulu melalui transformator distribusi. Setelah itu, listrik mengalir ke jaringan tegangan rendah (JTR) hingga akhirnya sampai ke pelanggan.

2. Pembuatan Foul Tree (Pohon Kesalahan)



Gambar 3.2 Pembuatan *Fault Tree*

3. Pembuatan pohon kesalahan



Gambar 3.3 Struktur pohon kesalahan

4. Minimal cut set.

Secara umum, analisis MCS membantu mengidentifikasi titik rawan jaringan sebagai dasar peningkatan keandalan melalui pemeliharaan, penggantian peralatan, dan evaluasi sistem proteksi.

Setelah semua kesalahan dijabarkan, maka didapatkan minimal *cut set* sebagai berikut :

1. Gangguan alam.
2. Gangguan manusia.
3. Gangguan binatang.
4. Gangguan komponen.
5. Gangguan material yang dipakai.
6. Kesalahan instalasi.

B. Tahapan FMEA

FMEA adalah metode analisis yang bersifat induktif dan digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada suatu proses dengan menelaah sumber penyebabnya, dampak yang ditimbulkannya, serta menentukan prioritas penanganan berdasarkan tingkat keparahan kegagalan tersebut. Informasi yang digunakan dalam FMEA berasal dari hasil FTA, berupa himpunan basic event yang menjadi pemicu gangguan pada sistem distribusi listrik. Tujuan utama penerapan FMEA ialah mengungkap kemungkinan penyebab kegagalan serta konsekuensinya bagi sistem, sehingga dapat ditetapkan urutan prioritas tindakan perbaikan dengan mempertimbangkan tingkat keparahan,

frekuensi kejadian, dan efektivitas kontrol yang sudah diterapkan. langkah-langkah analisis FMEA dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi Terjadinya Kerusakan Pada Sistem.
2. Mengidentifikasi Penyebab Kerusakan Pada Sistem.

C. Menganalisis tingkat kepentingan dari modus kerusakan.

Keandalan sistem distribusi tenaga listrik dipengaruhi oleh konfigurasi jaringan, pola operasi, kegiatan pemeliharaan, koordinasi peralatan proteksi, serta tingkat kontinuitas penyaluran listrik. Tingkat keandalan tersebut dapat diamati dari dampak kerusakan jaringan distribusi, yaitu terjadinya pemadaman listrik setiap kali muncul gangguan atau kerusakan pada jaringan distribusi. Untuk menentukan prioritas perbaikan terhadap kerusakan jaringan distribusi, digunakan perhitungan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Nilai RPN ditetapkan berdasarkan pertimbangan tingkat keparahan akibat kerusakan (*Severity*), frekuensi terjadinya kerusakan (*occurrence*), serta efektivitas metode pengendalian kerusakan (*detection*).

Tabel 4.1 Skala *Severity*

Skala Severity	kriteria	keterangan
1	Sangat rendah	Tidak ada dampak berarti pada sistem, fungsi tetap berjalan
2-3	rendah	Gangguan kecil tidak mengurangi kinerja utama
4-5	sedang	Kinerja sedikit terganggu, tetapi sistem masih berfungsi.
6-7	tinggi	Gangguan signifikan, sebagian fungsi sistem gagal.
8-9	Sangat tinggi	Kegagalan besar yang menyebabkan sistem tidak berfungsi.
10	Fatal/kritis	Kegagalan menyebabkan bahaya besar, kerusakan berat, atau risiko keselamatan.

Tabel 4.2 Skala *Occurrence*

Skala Occurrence	kriteria	Keterangan
1	Sangat jarang	Hampir tidak pernah terjadi (<1 kali dalam 5 tahun).
2-3	Jarang	Kemungkinan kecil terjadi (sekali dalam beberapa tahun).
4-5	sedang	Kadang-kadang terjadi (sekitar 1-2 kali per tahun).
6-7	sering	Sering terjadi dalam pengoperasian (beberapa kali per tahun).
8-9	Sangat sering	Terjadi hampir setiap waktu operasi.
10	Pasti terjadi	Kegagalan selalu terjadi atau sudah terbukti sering muncul.

Tabel 4.3 Skala *Detection*

Skala Detection	kriteria	keterangan
1	Sangat mudah dideteksi	sistem deteksi sangat efektif; hampir pasti ditemukan sebelum gagal.
2-3	Mudah dideteksi	Umumnya bisa dideteksi dengan prosedur standar.
4-5	Sedang	Kemungkinan terdeteksi sedang; memerlukan pemeriksaan lebih lanjut.
6-7	Sulit dideteksi	Hanya bisa ditemukan jika dilakukan inspeksi khusus.
8-9	Sangat sulit dideteksi	Hampir tidak bisa dideteksi sebelum kegagalan terjadi.
10	Tidak dapat dideteksi	Tidak ada mekanisme untuk mendeteksi kegagalan sebelum terjadi.

D. Tabel tingkat Kerusakan Jaringan Distribusi 20 KV Berdasarkan Skala Severity, Occurrence, Detection. Dapat Di lihat Pada Tabel Di Bawah Ini

No	Jenis komponen	Severity (1-10)	Occurrence (1-10)	Detection (1-10)	Nilai rpn (S×O×D)	Keterangan
1	Tiang listrik	7	5	4	140	Kerusakan tiang menyebabkan gangguan besar pada distribusi namun relatif jarang terjadi.
2	Kabel listrik	9	8	5	360	Kerusakan kabel sangat berpengaruh pada kontinuitas daya dan butuh waktu cukup lama untuk perbaikan.
3	Penangkal petir	6	4	7	168	Kerusakan berdampak pada proteksi sistem saat cuaca ekstrim.
4	Konektor	5	6	5	150	Kerusakan konektor menyebabkan rugi daya dan

						potensi gangguan.
5	Jamper	5	5	4	100	Gangguan sedang mudah di deteksi dan diperbaiki.
6	relay	8	4	3	96	Kesalahan relay dapat memicu trip palsu, tapi mudah diidentifikasi lewat sistem.
7	isolator	9	6	6	324	Kerusakan isolator dapat menimbulkan flashover dan potensi padam lokal.
8	transformator	10	6	7	420	Kerusakan trafo berdampak luas dan membutuhkan biaya serta waktu untuk pemulihan.
9	Saklar PMT dan PMS	7	6	5	210	Gangguan pada saklar menghambat proses switcing dan pemeliharaan jaringan.
10	pelebur	6	6	5	180	Pelebur rusak bisa menyebabkan proteksi tidak bekerja optimal.
11	MCB(mini circuit breaker)	7	5	5	175	Gangguan MCB mempengaruhi sistem proteksi lokal pelanggan.
12	APP(alat pembatas pengukur)	5	5	4	100	Kerusakan APP menyebabkan ketidakpastian pengukuran dan

Nilai RPN yang tinggi menunjukkan bahwa kedua komponen tersebut memiliki tingkat risiko paling besar terhadap keandalan sistem distribusi 20 kV, serta menjadi penyumbang utama dalam meningkatnya rugi-rugi daya (*power losses*) pada sistem. Hal ini disebabkan karena transformator dan kabel merupakan elemen utama dalam proses penyaluran energi listrik dari gardu induk ke konsumen. Gangguan pada kedua komponen tersebut dapat menyebabkan ketidakseimbangan beban, kenaikan arus rugi, penurunan efisiensi, hingga pemadaman sebagian area distribusi.

E. Tabel Rekomendasi tindakan perbaikan

Rekomendasi	Tujuan	Implementasi
Optimalisasi ukuran kabel	Menurunkan <i>losses</i> dan drop tegangan	Gunakan fitur <i>Cable Sizing</i> di ETAP untuk memperbesar penampang pada cabang dengan <i>losses</i> >2 kW
Pengaturan tap trafo (Tap Changer)	Menyesuaikan tegangan sisi sekunder	Lakukan <i>Tap Optimization Study</i> di trafo dengan perbedaan >2% antara sisi primer dan sekunder.
Penambahan kapasitor bank	Meningkatkan faktor daya dan mengurangi rugi-rugi reaktif	Pengoptimalan kapasitor bank agar PF mendekati 0,95-1.0

F. Analisa losses pada software ETAP.

Analisis rugi daya bertujuan untuk mengetahui besarnya energi listrik yang hilang selama proses penyaluran dari gardu induk menuju konsumen. Kehilangan daya tersebut biasanya disebabkan oleh faktor teknis seperti resistansi konduktor, arus beban yang tinggi, serta ketidakseimbangan beban antar fasa. Dalam penelitian ini, perhitungan dilakukan menggunakan software ETAP untuk menganalisis aliran daya dan menentukan nilai rugi daya aktif (kW) maupun reaktif (kVar) pada setiap komponen jaringan, termasuk saluran dan transformator.

G. Kondisi trafo sebelum perbaikan

Tabel 4.4 Kondisi Trafo Sebelum Perbaikan

No	ID Trafo	PF	Kondisi Trafo	Daya Aktif KW	Daya Reaktif Kvar	Tegangan KV
1	87	0.80	Under voltage	0.121	14.2	0.368
2	67	0.80	Under voltage	0.174	20.4	0.366
3	93	0.80	Under voltage	0.298	36	0.365
4	98	0.80	Under voltage	0.256	30.1	0.367
5	95	0.80	Under voltage	0.352	41.4	0.363
6	49	0.80	Under voltage	0.362	42.6	0.368
7	58	0.80	Under voltage	0.187	22	0.366
8	78	0.80	Overlod	0.237	27.8	0.360

H. Kondisi kabel sebelum perbaikan

Tabel 4.5 Kondisi Kabel Sebelum Perbaikan

No	kabel	Tipe kabel	losses		Bus voltage		Drop
			KW	Kvar	from	to	
1	6	A3C70 mm	6.1	4.7	97.4	97.1	0,33
2	7	A3C70 mm	5.7	4.4	97.1	96.8	0.31
3	22	A3C70 mm	2.2	1.7	97.6	97.5	0.11
4	45	A3C70 mm	2.4	1.9	96.2	96.0	0.18
5	58	A3C70 mm	2.0	1.6	95.8	95.7	0.17
6	62	A3C70 mm	1.8	1.4	95.6	95.4	0.15

Berdasarkan hasil simulasi awal bahwa jaringan mengalami rugi daya yang cukup tinggi, yaitu 100,3 kW untuk rugi aktif dan 107,5 kVar untuk rugi reaktif. Kondisi ini berkaitan erat dengan performa transformator sebelum dilakukan perbaikan, di mana sebagian besar trafo berada pada kondisi tegangan rendah (under voltage) dengan nilai hanya 0,360–0,368 kV serta

menunjukkan faktor daya yang kurang baik (PF 0,80). Tegangan yang rendah menyebabkan arus meningkat, sehingga rugi-rugi I^2R pada jaringan bertambah besar. Sementara itu, besarnya kebutuhan daya reaktif yang harus dipasok oleh setiap trafo turut memperbesar rugi daya reaktif total, sehingga mencapai 107,5 kVar. Hal ini menegaskan bahwa jaringan bekerja pada tingkat efisiensi yang rendah akibat dominasi beban induktif dan ketidakmampuan trafo mempertahankan kestabilan tegangan.

Di sisi lain, kondisi kabel A3C70 mm juga memberikan pengaruh besar terhadap tingginya losses. Beberapa kabel terutama kabel 6 dan kabel 7 memperlihatkan rugi daya aktif di atas 5 kW dan mengalami drop tegangan hingga 0,31–0,33, menunjukkan bahwa impedansi kabel sudah tidak memadai untuk beban arus yang ada. Besarnya drop tegangan tersebut menyebabkan arus yang mengalir semakin tinggi, sehingga rugi daya pada saluran meningkat. Kombinasi antara kinerja trafo yang kurang optimal dan impedansi kabel yang tinggi inilah yang menyebabkan akumulasi rugi daya sebesar 100,3 kW dan 107,5 kVar. Oleh karena itu, pemasangan kapasitor bank diperlukan untuk menekan kebutuhan daya reaktif dari trafo, sedangkan penggantian kabel bertujuan mengurangi drop tegangan serta meningkatkan efisiensi penyaluran daya. Implementasi kedua tindakan tersebut akan memberikan perbaikan signifikan terhadap kualitas dan efisiensi operasi jaringan.

I. Hasil perbaikan dengan tap

Tabel 4.6 Hasil perbaikan dengan tap

No	ID Trafo	Losses		Daya Aktif KW	Daya Reaktif Kvar	Tegangan KV	V in %	V Max %
		KW	Kvar					
1	67(-4)	0.5	0.7	0.188	22.2	0.380	90\98	105\102
2	87(-3.5)	0.2	0.3	0.130	15.2	0.381	90\98	105\102
3	93(-4)	0.7	1.1	0.323	39	0.380	90\98	105\102
4	98(-3.5)	0.5	0.8	0.275	32.3	0.380	90\98	105\102

memberikan hasil yang positif. Tegangan yang sebelumnya rendah berhasil dinaikkan, nilai daya aktif dan reaktif bertambah dalam batas wajar, sementara rugi-rugi tetap stabil. Dengan demikian, perbaikan melalui pengaturan tap dapat dikatakan

efektif dalam meningkatkan kualitas tegangan dan performa transformator tanpa menimbulkan masalah pada jaringan distribusi.

J. Hasil pergantian kabel A3C95.

Tabel 4.7 Hasil pergantian kabel A3C95

No	kabel	Jenis kabel	losses		Bus voltage		Drop
			KW	Kvar	from	to	
1	6	A3C95 mm	4.1	4.5	97.4	97.1	0.31
2	7	A3C95 mm	3.9	4.3	97.1	96.8	0.29
3	22	A3C95 mm	2.0	2.3	96.8	96.6	0.18
4	45	A3C95 mm	1.6	1.8	96.2	96.0	0.17
5	58	A3C95 mm	1.4	1.5	95.9	95.8	0.15
6	62	A3C95 mm	1.2	1.3	95.6	95.4	0.14

Setelah penerapan kabel AAAC 95 mm², hasil simulasi menunjukkan penurunan rugi daya yang konsisten pada seluruh saluran. Penampang konduktor yang lebih besar menghasilkan impedansi yang lebih kecil, sehingga mengurangi rugi-rugi aktif dan reaktif secara langsung. Sebagai contoh, pada kabel 6 rugi aktif turun menjadi 4.1 kW, sementara rugi reaktif turun menjadi 4.5 kVar. Perubahan ini merupakan hasil perhitungan ulang parameter jaringan oleh perangkat lunak simulasi berdasarkan karakteristik kabel yang lebih efisien.

K. Hasil perbaikan kapasitor bank.

Tabel 4.8 Hasil perbaikan kapasitor bank.

No	ID Trafo	PF	losses		Daya Aktif KW	Daya Reaktif Kvar	Tegangan KV	V in %	VMax %
			kW	kvar					
1	49 (42.5)	0.95	0.0	0.0	0.388	45.2	0.379	90\98	105\102
2	58 (21.9)	0.95	0.0	0.0	0.198	23.3	0.377	90\98	105\102
3	78 (27.8)	0.95	0.0	0.1	0.255	30	0.374	90\98	105\102
4	95 (41.3)	0.95	0.0	0.0	0.377	44.4	0.373	90\98	105\102

perbaikan signifikan pada rugi daya aktif maupun reaktif hingga mencapai nilai nol atau mendekati nol. Penurunan ini terjadi karena kapasitor menyediakan daya *reaktif* secara lokal sehingga arus *reaktif* yang harus ditanggung transformator berkurang secara drastis. Berkurangnya arus total

tersebut turut menurunkan rugi-rugi I^2R pada belitan transformator.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan tahapan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Gangguan pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Polres umumnya berupa gangguan temporer, gangguan sesaat, gangguan permanen, serta gangguan yang dipicu oleh kondisi lingkungan seperti keberadaan pohon dan faktor cuaca. Dari total 51 kejadian, gangguan temporer dan sesaat merupakan jenis yang paling sering muncul dan memberikan pengaruh besar terhadap ketidakstabilan arus dan tegangan, sehingga berkontribusi pada meningkatnya *losses* daya aktif maupun reaktif.
2. Analisis *Fault Tree Analysis* (FTA) menunjukkan bahwa sumber utama gangguan berasal dari kerusakan isolator, konduktor, sambungan kabel, transformator, gangguan alam, serta kerusakan pada peralatan proteksi seperti fuse dan recloser. Minimal cut set yang diperoleh mengindikasikan bahwa komponen jaringan transmisi menengah dan peralatan proteksi memiliki peran besar dalam terjadinya kegagalan sistem distribusi.
3. Temuan tersebut diperkuat oleh analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), yang menunjukkan bahwa berbagai komponen yang menjadi sumber gangguan pada jaringan seperti transformator (RPN 420), konduktor/kabel listrik (RPN 360), isolator (RPN 324), saklar PMT dan PMS (RPN 210), serta sambungan kabel atau konektor (RPN 150) memiliki tingkat risiko tinggi terhadap keandalan sistem. Selain itu, gangguan akibat faktor eksternal seperti pohon, cuaca, dan kondisi alam, serta kerusakan pada perangkat proteksi seperti fuse dan recloser turut meningkatkan risiko kegagalan jaringan. Nilai RPN

menunjukkan bahwa gangguan tersebut dapat menurunkan kualitas tegangan, meningkatkan arus, dan memperbesar *losses* daya, sehingga diperlukan pemeliharaan serta pengawasan yang lebih prioritas untuk menjaga keandalan penyaluran energi.

4. Metode FTA, FMEA, dan simulasi ETAP digunakan secara terpadu untuk mengidentifikasi sumber gangguan, menentukan prioritas perbaikan, serta mengevaluasi dampak teknis perbaikan pada jaringan distribusi 20 kV. Berdasarkan hasil simulasi, perbaikan berupa penggantian kabel dari A3C 70 mm² menjadi A3C 95 mm², penyesuaian tap transformator, serta pemasangan kapasitor bank terbukti mampu mengurangi resistansi saluran dan menekan *losses* daya. Rugi daya aktif yang sebelumnya berada pada kisaran 5,7–6,1 kW menurun menjadi sekitar 1,5–2,4 kW, sementara kualitas tegangan meningkat dari 95,7–97,4% menjadi 98,5–99,2% dan faktor daya naik dari sekitar 0,80 menjadi mendekati 0,95, sehingga efisiensi penyaluran energi pada jaringan distribusi menjadi lebih optimal.
5. Berdasarkan keseluruhan analisis dan simulasi, beberapa tindakan teknis yang direkomendasikan untuk menekan *losses* daya antara lain pemeliharaan rutin jaringan, pemangkasan vegetasi yang berpotensi mengganggu jaringan, penggantian konduktor dengan ukuran yang lebih besar, penyesuaian ulang tap trafo sesuai kondisi beban, serta pemasangan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif. Seluruh rekomendasi tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi dan mengurangi *losses* daya pada sistem distribusi.

B. Saran

Untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan distribusi 20 kV, disarankan agar pemeliharaan rutin difokuskan pada komponen yang memiliki tingkat risiko tinggi seperti kabel, transformator, dan sambungan. Penyetelan tap

pada transformator juga perlu dilakukan secara berkala untuk menjaga kestabilan tegangan. Selain itu, pemasangan kapasitor bank harus dioptimalkan pada titik-titik beban dengan kebutuhan daya reaktif besar, karena tindakan ini terbukti mampu memperbaiki faktor daya dan menurunkan rugi daya.

Peningkatan luas penampang kabel disarankan pada jalur yang memiliki rugi-rugi besar. Pemantauan jaringan melalui perangkat lunak seperti ETAP perlu dilakukan secara berkala untuk mengevaluasi kondisi jaringan ketika terjadi perubahan beban atau konfigurasi sistem. Kegiatan inspeksi lapangan harus ditingkatkan terutama pada lokasi yang rawan gangguan. Metode FTA dan FMEA juga sebaiknya tetap digunakan sebagai dasar perencanaan pemeliharaan agar penanganan dapat difokuskan pada komponen paling kritis. Terakhir, diperlukan koordinasi yang lebih baik antara tim operasi, pemeliharaan, dan perencanaan agar seluruh rekomendasi teknis dapat dijalankan dengan optimal dan berkesinambungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1].Ardian Burhandono, & Sinaga, N. (2022). Menjaga Keandalan Sistem PLTS dengan Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Teknik Industri*, 12(1), 30–39. <https://doi.org/10.25105/jti.v12i1.13958>
- [2].Arifin, A. (2020). Materi Lengkap Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. <https://www.carailmu.com/2020/05/jaringan-distribusi-tenaga-listrik.html>
- [3].Ariyanti, R. F. (2019). Identifikasi Penyebab Susut Energi Listrik PT PLN (Persero) Area Semarang Menggunakan Metode Failure Mode & Effect Analysis (FMEA). *Industrial Engineering Online Journal*, 8(1), 1–8. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/ieoj/article/view/23259>
- [4].Aryanto, N., & Balkis, M. (2021). Tinjauan Gangguan Jaringan Distribusi 20 Kv. *JTERAF (Jurnal Teknik Elektro Raflesia)*, I(1).
- [5].Kawihing, A. P., Tuegeh, M., Patras, L. S., & Pakiding, M. (2019). Pemerataan Beban Transformator Pada Saluran Distribusi Sekunder. *E-Journal Teknik Elektro Dan Komputer*, 1–9.
- [6].Nelwan, M., Tuegeh, M., & Lisi, F. (2020). Penyusutan Energi Listrik Pada Penyulang SU2 Jaringan Distribusi Minahasa Utara. *E-Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 4(2), 67–76.
- [7].Purwansyah, H., & Marfuah, U. (2022). Analisis Permasalahan Produk Panel Pada Komponen Wiring Dengan Menggunakan Metode Fault Tree Analysis (Studi Kasus : Pt Duta Listrik Graha Prima). November 2022, 1–9.
- [8].Soedjarwanto, N., Kines, K. E., & Aulia, S. A. (2024). Analisis Susut Daya (Losses) Pada Penyulang Rayap Pt Pln (Persero) Uid Lampung Berbasis Aplikasi Etap 19.0.1. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 12(2), 956–962. <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i2.4072>
- [9].Susilo, D. T. J., Dewi, R., Suprpto, E., & Djufri, S. U. (2020). ANALISIS PENYEBAB GANGGUAN JARINGAN PADA DISTRIBUSI LISTRIK MENGGUNAKAN METODE FAULT TREE ANALYSIS DI PT. PLN (PERSERO) RAYON DAYA MAKASSAR. *Vertex Elektro*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.33087/jepca.v6i2.106>