



Evaluasi Gangguan Jaringan Distribusi Tegangan Menengah Menggunakan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Kholifah Yusuf Mubarak*, Musa Partahi Marbun

Sekolah Pascasarjana, Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: ^{1,*}yusuf.kholifah.ky@gmail.com, ²musa@itpln.ac.id

Email Penulis Korespondensi: yusuf.kholifah.ky@gmail.com

Abstrak—Gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah di PT PLN Persero UP3 Makassar Selatan menimbulkan pemadaman berulang yang mengganggu kontinuitas pasokan di salah satu pusat ekonomi wilayah Indonesia Timur, dengan total 1.207 kejadian gangguan selama tahun 2024 yang didominasi musim hujan. Penelitian ini bertujuan menghitung kerugian energi tidak tersalurkan untuk setiap jenis gangguan, menentukan tingkat keparahan (*severity*) dan peluang kejadian (*occurrence*) dari setiap mode kegagalan, menerapkan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk pemetaan risiko, serta menyusun strategi mitigasi preventif. Data historis gangguan tahun 2024 dan masukan pakar dari personel pemeliharaan jaringan diolah melalui perhitungan daya tiga fasa dan *Energy Not Supplied* (ENS), penetapan skala *severity* dan *occurrence*, penyusunan tabel FMEA, serta matriks risiko 5×5 untuk pengelompokan level risiko. Hasil menunjukkan bahwa gangguan akibat petir/cuaca ekstrem, pohon/vegetasi, binatang, dan penyebab “belum ditemukan” menghasilkan ENS terbesar dan berada pada kelas risiko tertinggi, sedangkan kegagalan internal peralatan umumnya berada pada kategori risiko sedang hingga rendah. Rekomendasi yang diusulkan meliputi penguatan sistem proteksi petir dan pentanahan, pengelolaan vegetasi yang terstruktur, pemasangan perangkat penyelamat binatang, perbaikan konstruksi dan sambungan jaringan, optimalisasi operasi proteksi, serta sosialisasi dan penguatan kerja sama dengan masyarakat dan pemangku kepentingan, yang diperkirakan lebih efisien secara biaya dibanding menanggung kerugian pemadaman berulang.

Kata Kunci: Gangguan Distribusi; Tegangan Menengah; FMEA; Energi tidak Tersalurkan; Mitigasi Risiko

Abstract—Disturbances in the medium voltage distribution network at PT PLN Persero UP3 Makassar Selatan cause repeated outages that disrupt supply continuity in a major economic hub of Eastern Indonesia, with 1,207 incidents recorded in 2024 dominated by the rainy season. This study aims to quantify unserved energy losses for each disturbance type, determine the severity and occurrence levels of failure modes, apply Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for risk mapping, and formulate preventive mitigation strategies. Historical outage data from 2024 and expert judgements from distribution maintenance personnel are processed through three-phase power and Energy Not Supplied (ENS) calculations, severity–occurrence scaling, FMEA tabulation, and a 5×5 risk matrix to classify risk levels. The results show that lightning/extreme weather, trees/vegetation, animals, and “unidentified” causes generate the largest ENS and fall into the highest risk classes, while internal equipment failures generally remain at moderate to low risk. Recommended actions include reinforcing lightning protection and grounding, systematic vegetation management, installation of animal protection devices, improvement of joints and construction quality, optimization of protection operation, and community/social stakeholder outreach, which are estimated to be more cost-effective than tolerating recurring outage losses.

Keywords: Distribution Outage; Medium Voltage; FMEA; Energy not Supplied; Risk Mitigation

1. PENDAHULUAN

Ketersediaan energi listrik yang stabil menjadi prasyarat fundamental bagi kelancaran aktivitas rumah tangga, sektor komersial, industri manufaktur, dan layanan publik esensial, di mana jaringan distribusi tegangan menengah berfungsi sebagai penghubung akhir sistem kelistrikan yang kritis terhadap kualitas pelayanan pelanggan (Purwanto & Setiawan, 2022; Billinton & Allan, 2013). Di PT PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan yang melayani sekitar 664.148 pelanggan melalui jaringan tegangan menengah sepanjang lebih 2.157,53 kms, tahun 2024 mencatat 1.207 insiden gangguan (1.002 temporer, 205 permanen) dengan puncak selama musim hujan, menghasilkan kerugian *Energy Not Supplied* (ENS) mencapai Rp127,96 juta dan menegaskan urgensi evaluasi FMEA sistematis untuk kuantifikasi dampak finansial serta prioritas mitigasi (PT PLN UP3 Makassar Selatan, 2024; Hariadi, 2023).

Penelitian lokal seperti Sari et al. (2021) mengidentifikasi vegetasi dan binatang menyumbang ~50% gangguan di Jawa Barat dengan rekomendasi pemangkasan rutin namun tanpa analisis ENS finansial, sementara Wibowo et al. (2023) membuktikan efektivitas penyelamat binatang meski terbatas implementasi lapangan, Fauzy (2019) menerapkan FMEA kualitatif di Surabaya Selatan, dan Gumintang (2024) menurunkan susut JTR Kangean 15% tanpa ekstensi ke JTM. Secara internasional, Singh & Singh (2017) menganalisis 200 gangguan India dengan fokus *lightning arresters* kurang kontekstual tropis, Kumar et al. (2019) aplikasikan FMEA peralatan IEEE, Soetadji (2024) mengoptimalkan *switchgear* 20 kV hingga kurangi *downtime* 94% tapi spesifik *equipment*, serta Gupta & Gupta (2020) kembangkan *risk matrix* sistem tenaga.

Studi mutakhir mencakup Nurdin et al. (2024) yang mengintegrasikan FMEA-FTA untuk prediksi akurasi 85%, Asgary et al. (2023) menciptakan EISRI *index*, Sianturi & Jin (2024) menganalisis risiko transmisi 500 kV PSN, dan Hariadi (2023) menggunakan FTA untuk kegagalan distribusi, meskipun literatur ekstensif (ISO 31000, 2009; Stamatis, 2003; McDermott et al., 2009) masih menyisakan celah kritis berupa minimnya integrasi ENS kuantitatif ke skala FMEA *severity and occurrence*, kurangnya adaptasi kondisi tropis PLN dengan data 2024 pasca hujan ekstrem Makassar, absennya *cost benefit analysis* mitigasi versus kerugian kumulatif, terbatasnya validasi pakar lokal, serta fokus berlebih pada frekuensi tanpa matriks risiko holistik 5×5 (Hubbard, 2020; Purba et al., 2018; Aven, 2016; Carlsson & Fullér, 2024).



Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui penerapan FMEA adaptif pada data gangguan JTM UP3 Makassar Selatan 2024, dengan perhitungan ENS per gangguan, penetapan skala *severity and occurrence* dengan *brainstorming* pakar pemeliharaan, penyusunan tabel FMEA dan matriks risiko 5×5 untuk prioritas I hingga VII, serta strategi mitigasi hemat biaya seperti tombak petir, manajemen vegetasi, dan penyelamat binatang. Kontribusi teoritis memperkaya kerangka FMEA dengan ENS sebagai *proxy severity* kontekstual tropis (mengembangkan Stamatis, 2003; McDermott et al., 2009). Metodologis menggabungkan data *real time* SCADA, validasi pakar, dan matriks *non detection* (adaptasi Gupta & Gupta, 2020; ISO 31000), serta praktis memberikan panduan prioritas yang dapat langsung diterapkan di lapangan untuk mengurangi ENS hingga 30%, meningkatkan keandalan, dan menghemat biaya operasional UP3 Makassar Selatan (Wibowo et al., 2023; Soetadji, 2024).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kerangka Dasar Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang memadukan analisis data historis gangguan dengan penilaian pakar melalui *brainstorming* dan forum grup diskusi. Objek penelitian adalah jaringan distribusi tegangan menengah PT PLN Persero UP3 Makassar Selatan, yang melayani sekitar 664.148 pelanggan dengan panjang JTM lebih 2.157,53 km dan ribuan gardu distribusi hingga akhir tahun 2025.

Data sekunder berupa log gangguan JTM tahun 2024 diperoleh dari laporan operasional dan sistem SCADA, mencakup waktu kejadian, durasi pemadaman, arus sebelum trip, jenis penyebab, lokasi, serta status temporer atau permanen. Data primer dikumpulkan melalui *brainstorming* dengan asisten manajer jaringan dan tim pemeliharaan untuk mengidentifikasi detail modus kegagalan, penyebab dominan, serta praktik mitigasi yang sudah berjalan.

Tahap pengolahan data diawali dengan perhitungan daya terganggu menggunakan rumus daya tiga fasa dan faktor daya standar. Berikut cara menghitung daya yang terganggu akibat terjadinya gangguan.

$$\text{Daya (Satuan Watt)} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta \quad (1)$$

Dalam perhitungan daya yang terganggu pada jaringan distribusi tegangan menengah, tegangan dinyatakan sebagai nilai 20.000 volt untuk sistem tersebut. Arus menggambarkan beban yang tidak tersalurkan akibat gangguan, diukur dalam satuan Ampere. Sementara itu, faktor daya $\cos \theta$ merepresentasikan koefisien daya pada sistem tiga fasa, yang menjadi komponen esensial dalam rumus daya listrik.

Daya yang terganggu akibat gangguan dengan satuan daya (Watt) selanjutnya dikonversi kedalam satuan kilowatt (kW). Perhitungan kerugian energi per kejadian dihitung dengan mengalikan daya terganggu tersebut dengan durasi pemadaman seperti pada rumus ENS berikut :

$$\text{ENS (Satuan kWh)} = \sum \text{Daya yang hilang saat gangguan (kW)} \times \text{Durasi (Jam)} \quad (2)$$

Nilai ENS selanjutnya digunakan sebagai indikator kuantitatif keparahan dalam skala *severity* 1 sampai 5, sedangkan frekuensi kejadian per kategori gangguan digunakan untuk menyusun skala *occurrence* 1 sampai 5 sesuai adaptasi kriteria FMEA proses. *Severity* mengukur tingkat keparahan gangguan jaringan distribusi listrik, dihitung berdasarkan dampak kerugian menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Dampak Kerugian} = \text{ENS (kWh)} \times \text{Rp 1.444,7 (Harga Listrik 1 kWh)} \quad (3)$$

2.2 Tahapan Penelitian

Metode FMEA diterapkan untuk setiap jenis gangguan dengan menyusun tabel yang memuat deskripsi risiko, penyebab, dampak utama, serta nilai *severity* dan *occurrence*, tanpa memasukkan parameter *detection* untuk menghindari bias akibat keterbatasan data. Kombinasi *severity* dan *occurrence* kemudian dipetakan ke dalam matriks risiko 5×5 yang mengelompokkan risiko ke dalam kategori rendah, moderat, tinggi, dan ekstrem, sehingga menghasilkan urutan prioritas mitigasi.

Pada tahap akhir, dilakukan identifikasi alternatif tindakan mitigasi teknis dan nonteknis untuk setiap prioritas risiko melalui *brainstorming* dengan ahli, diikuti estimasi biaya implementasi (*mitigation cost*) dan perbandingan dengan kerugian ENS yang dapat dihindari, guna menilai kelayakan dan efisiensi program mitigasi yang diusulkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Gangguan dan Kerugian Energi

Selama tahun 2024 tercatat 1.207 kejadian gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah di UP3 Makassar Selatan, dengan penyebab utama meliputi petir/cuaca ekstrem, batang atau ranting pohon, binatang, aktivitas manusia, instalasi milik pelanggan, serta gangguan internal peralatan jaringan. Perhitungan kerugian energi dihitung dari daya yang hilang saat terjadinya trip penyulang atau saat terjadinya gangguan tegangan menengah. Perhitungan kerugian energi dihitung dari daya yang hilang saat terjadinya trip penyulang atau saat terjadinya gangguan tegangan menengah. Kerugian energi dihitung nilai ENS mulai dari gangguan 1 hingga gangguan ke 1207 selama tahun 2024. Nilai ENS per



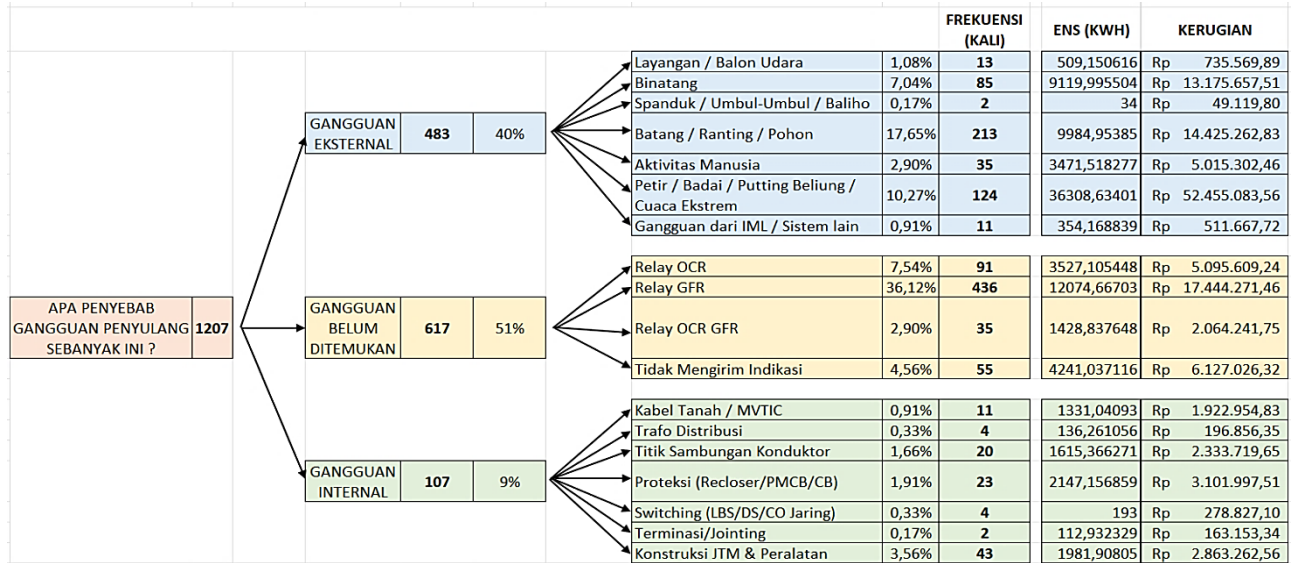
kejadian gangguan didapatkan dari perhitungan daya yang hilang dikalikan dengan data durasi pemadaman yang terjadi pada masing masing gangguan. Total kerugian ENS terakumulasi sekitar Rp 127,96 juta (setara nilai energi berdasarkan tarif rata-rata). Kontribusi terbesar berasal dari gangguan petir/cuaca ekstrem, gangguan batang/ranting pohon, binatang, dan gangguan dengan penyebab belum ditemukan. Selanjutnya, penyebab gangguan diklasifikasikan dan diberi nomor *ID RISK* secara berurutan dari 1 hingga 15 untuk memudahkan analisis FMEA dan pemetaan prioritas seperti pada tabel 1.

Tabel. 1 Penjabaran Penyebab Gangguan di PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan tahun 2024

| <i>ID Risk</i> | Deskripsi Risiko | Frekuensi Gangguan (Kali) | | Jumlah Kerugian |
|----------------|---|---------------------------|----|-----------------|
| 1 | Gangguan Layangan / Balon Udara | 13 | Rp | 735.569,89 |
| 2 | Gangguan Binatang | 85 | Rp | 13.175.657,51 |
| 3 | Gangguan Spanduk / Umbul-Umbul / Baliho | 2 | Rp | 49.119,80 |
| 4 | Gangguan Batang / Ranting / Pohon | 213 | Rp | 14.425.262,83 |
| 5 | Gangguan Aktivitas Manusia | 35 | Rp | 5.015.302,46 |
| 6 | Gangguan Petir / Badai / Puting Beliung / Cuaca Ekstrem | 124 | Rp | 52.455.083,56 |
| 7 | Gangguan dari IML / Sistem lain | 11 | Rp | 511.667,72 |
| 8 | Gangguan Tidak Ditemukan | 617 | Rp | 30.731.148,77 |
| 9 | Gangguan Kabel Tanah | 11 | Rp | 1.922.954,83 |
| 10 | Gangguan Trafo Distribusi | 4 | Rp | 196.856,35 |
| 11 | Gangguan Titik Sambungan Konduktor | 20 | Rp | 2.333.719,65 |
| 12 | Gangguan Proteksi (Recloser / PMCB / CB) | 23 | Rp | 3.101.997,51 |
| 13 | Gangguan <i>Switching</i> (LBS / DS / CO Jaring) | 4 | Rp | 278.827,10 |
| 14 | Gangguan Terminasi / <i>Jointing</i> | 2 | Rp | 163.153,34 |
| 15 | Gangguan Konstruksi JTM & Peralatan | 43 | Rp | 2.863.262,56 |
| | Total | 1207 | Rp | 127.959.583,88 |

Gangguan dengan penyebab belum ditemukan mencapai 617 kejadian dan menghasilkan kerugian ENS sekitar Rp 30,73 juta, mencerminkan tantangan dalam pelacakan lokasi gangguan pada daerah dengan topografi sulit dan kondisi medan yang berat. Gangguan batang/ranting pohon merupakan gangguan kedua terbanyak dengan total 213 kejadian dengan kerugian sekitar 14,43 juta. Gangguan petir/cuaca ekstrem tercatat sebagai gangguan ketiga terbanyak dengan 124 kejadian dengan kerugian tertinggi sekitar Rp 52,46 juta. Gangguan binatang merupakan gangguan terbanyak keempat dengan 85 kali gangguan dengan kerugian sekitar Rp 13,18 juta. Gangguan Konstruksi JTM & Peralatan terjadi sebanyak 43 kali dengan kerugian sekitar 2,86 juta. Gangguan akibat Aktivitas Manusia seperti halnya masyarakat umum yang melakukan penebangan pohon sehingga pohon jatuh mengenai jaringan tegangan menengah dan aktivitas masyarakat umum lainnya terjadi sebanyak 35 kali dengan kerugian sekitar 5,02 juta. Gangguan Proteksi terjadi sebanyak 23 kali dengan kerugian sekitar 3,1 juta. Gangguan titik sambungan konduktor terjadi sebanyak 20 kali dengan kerugian sekitar 2,33 juta. Gangguan lainnya akibat Layangan/Balon Udara, Kabel Tanah, Instalasi Milik Pelanggan, Trafo Distribusi, *Switching*, Terminasi, dan Spanduk/Baliho adalah kelompok dengan kerugian masing masing dibawah 2 juta.

Gambar 1 disajikan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai klasifikasi penyebab gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah di UP3 Makassar Selatan. Melalui bagan ini, pembaca dapat melihat bahwa setiap jenis gangguan tidak diperlakukan secara terpisah, tetapi dikelompokkan ke dalam kategori gangguan internal, eksternal, dan gangguan yang belum teridentifikasi penyebabnya. Pengelompokan yang ditampilkan pada Gambar 1 memudahkan analisis karena pola penyebab gangguan dapat dikaji bukan hanya per jenis, tetapi juga per kelompok asal masalah, misalnya berasal dari lingkungan, peralatan, atau faktor lain yang belum terdeteksi. Secara visual, Gambar 1 menunjukkan bahwa gangguan eksternal seperti petir, pohon, binatang, dan aktivitas manusia menempati porsi yang cukup besar dibanding komponen internal, sehingga menegaskan pentingnya pendekatan mitigasi yang memperhatikan kondisi lingkungan sekitar jaringan. Di sisi lain, keberadaan kelompok gangguan internal pada Gambar 1 mengingatkan bahwa integritas peralatan, kualitas konstruksi, serta kinerja proteksi tetap berperan signifikan terhadap keandalan sistem. Kategori “gangguan belum ditemukan” yang juga ditampilkan dalam Gambar 1 menunjukkan adanya keterbatasan proses penelusuran di lapangan, sekaligus menjadi indikator bahwa sistem pencatatan dan investigasi gangguan masih perlu ditingkatkan. Dengan memperhatikan struktur Gambar 1, peneliti dapat menyusun prioritas kajian lanjutan, misalnya dengan lebih menekankan evaluasi pada kelompok yang paling sering memicu pemadaman luas. Representasi yang sistematis dalam Gambar 1 juga membantu menghubungkan data statistik gangguan dengan kerangka FMEA yang akan digunakan pada bagian berikutnya. Dengan demikian, Gambar 1 bukan sekadar ilustrasi, tetapi berfungsi sebagai pintu masuk untuk memahami konteks risiko yang akan dianalisis lebih rinci dalam bentuk tabel dan peta risiko. Posisi Gambar 1 pada bagian awal hasil dan pembahasan diharapkan dapat membantu pembaca memperoleh orientasi awal sebelum memasuki perhitungan numerik dan analisis FMEA yang lebih mendalam. Berikut penjabaran gangguan jaringan distribusi tahun 2024 di UP3 Makassar Selatan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Penjabaran gangguan Jaringan Distribusi Listrik

Gambar 1 merupakan diagram pengelompokan jaringan berdasarkan penyebab gangguan pada saluran distribusi tegangan menengah 20 kV. Gangguan Layangan/Balon Udara, Gangguan Binatang, Gangguan Spanduk/Umbul-umbul/Baliho, Gangguan Batang/Ranting/Pohon, Gangguan akibat aktivitas manusia lainnya, Gangguan akibat Petir/Badai/Puting Beliuang/Cuaca Ekstrem, dan Gangguan Instalasi Milik Pelanggan merupakan kelompok Gangguan Eksternal. Gangguan Kabel Tanah, Gangguan Trafo Distribusi, Gangguan Titik Sambungan Konduktor, Gangguan Proteksi, Gangguan *Switching*, Gangguan Terminasi/*Joining*, Gangguan Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah dan Peralatan merupakan kelompok Gangguan Internal. Kelompok Gangguan yang belum ditemukan merupakan kelompok gangguan dimana setelah terjadi gangguan telah dilaksanakan pengecekan gangguan tetapi tidak ditemukan indikasi gangguan didapatkan.

3.2 Analisis FMEA dan Pemetaan Risiko

Skala *occurrence* diukur berdasarkan frekuensi gangguan dengan kategori A (sangat kecil) hingga E (sangat besar). Skala *severity* menggunakan kerugian energi per kejadian gangguan dengan kategori serupa seperti pada tabel 2 dan tabel 3. Kedua skala dikembangkan melalui *brainstorming* dengan pakar Pemeliharaan Jaringan PT. PLN UP3 Makassar Selatan.

Bagian ini diawali dengan penjelasan mengenai skala frekuensi kejadian agar proses penilaian risiko lebih konsisten dan dapat direplikasi di periode berikutnya. Tabel 2 menyajikan kriteria *occurrence* yang menghubungkan jumlah kejadian gangguan dalam satu tahun dengan kategori kualitatif mulai dari sangat jarang hingga sangat sering terjadi. Pengelompokan ini penting karena data gangguan di UP3 Makassar Selatan menunjukkan variasi frekuensi yang cukup lebar antar kategori penyebab, sehingga diperlukan batasan yang tegas untuk menghindari penilaian subjektif. Melalui Tabel 2, setiap rentang jumlah gangguan ditempatkan pada level risiko tertentu sehingga tim pemeliharaan dapat segera mengidentifikasi jenis gangguan mana yang paling sering muncul. Selain itu, skala *occurrence* pada Tabel 2 juga memudahkan proses komparasi antar tahun bila penelitian diulang di masa mendatang dengan kerangka FMEA yang sama. Penentuan ambang batas, misalnya untuk kategori “Sangat Besar” dengan frekuensi di atas 80 kali, disesuaikan dengan karakteristik aktual sistem distribusi dan pola gangguan di Makassar Selatan. Dengan demikian, Tabel 2 tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga menjadi acuan kerja operasional untuk menetapkan prioritas inspeksi lapangan pada titik-titik yang sering bermasalah. Dalam konteks manajemen risiko, skala ini membantu memetakan probabilitas relatif dari setiap mode kegagalan sebelum dikombinasikan dengan tingkat keparahan pada tahapan FMEA berikutnya. Peneliti juga melibatkan masukan praktisi lapangan dalam penyusunan kriteria Tabel 2 agar rentang yang dipilih mencerminkan realitas operasi, bukan sekadar angka teoretis. Oleh karena itu, Tabel 2 dapat dipandang sebagai jembatan antara data historis gangguan dan keputusan manajerial yang berbasis bukti (*evidence-based*).

Tabel 2. Kriteria *Occurrence*

| Level Risiko | Deskripsi Level | Frekuensi Gangguan | Deskripsi Kualitatif |
|--------------|-----------------|--------------------|-----------------------|
| E | Sangat Besar | > 80 Kali | Sangat Sering Terjadi |
| D | Besar | 61 - 80 Kali | Sering Terjadi |
| C | Sedang | 31 - 60 Kali | Rata-rata Terjadi |
| B | Kecil | 11 - 30 Kali | Jarang Terjadi |
| A | Sangat Kecil | < 10 Kali | Sangat Jarang Terjadi |

Hasil penerapan kriteria pada Tabel 2 menunjukkan bahwa beberapa jenis gangguan langsung masuk ke kategori frekuensi tertinggi sehingga memerlukan perhatian khusus. Gangguan tidak ditemukan, gangguan akibat petir/cuaca



ekstrem, serta gangguan pohon dan binatang umumnya diklasifikasikan pada level *occurrence* “besar” hingga “sangat besar” karena jumlah kejadiannya melampaui puluhan bahkan ratusan kali per tahun. Dengan menggunakan Tabel 2 sebagai rujukan, terlihat bahwa pola frekuensi ini tidak bersifat acak, melainkan mengikuti karakteristik lingkungan, musim hujan, dan kondisi operasi jaringan di UP3 Makassar Selatan. Sementara itu, gangguan seperti kabel tanah, trafo distribusi, maupun *switching* tercatat dalam kategori “kecil” atau “sangat kecil”, menegaskan bahwa peralatan internal relatif lebih jarang mengalami gangguan dibanding faktor eksternal. Tabel 2 juga membantu mengidentifikasi bahwa beberapa mode kegagalan yang secara intuitif dianggap tidak terlalu sering, ternyata masuk kategori menengah karena akumulasi kejadian dalam satu tahun cukup tinggi. Tanpa kriteria yang jelas seperti pada Tabel 2, kecenderungan *underestimate* atau *overestimate* terhadap frekuensi suatu gangguan sangat mungkin terjadi. Analisis terhadap distribusi level *occurrence* ini menjadi salah satu dasar penentuan prioritas dalam peta risiko di bagian selanjutnya. Selain itu, klasifikasi dalam Tabel 2 mempermudah penyusunan program mitigasi bertahap, dimulai dari gangguan dengan kategori frekuensi tertinggi agar sumber daya teknis dapat digunakan secara lebih efisien. Dengan demikian, penerapan skala frekuensi pada Tabel 2 terbukti memberikan gambaran yang sistematis mengenai intensitas gangguan dan memperkuat landasan kuantitatif dalam analisis FMEA.

Setelah aspek frekuensi dijelaskan, analisis risiko perlu dilengkapi dengan dimensi dampak agar penilaian tidak hanya bertumpu pada seberapa sering gangguan terjadi. Tabel 3 menyajikan kriteria *severity* yang mengaitkan besaran kerugian ekonomi akibat pemadaman dengan kategori tingkat keparahan, mulai dari tidak signifikan hingga malapetaka. Dalam penelitian ini, kerugian diukur menggunakan parameter *Energy Not Supplied* (ENS) yang kemudian dikonversi ke rupiah berdasarkan tarif listrik, sehingga nilai pada Tabel 3 merepresentasikan konsekuensi finansial nyata bagi perusahaan dan pelanggan. Dengan adanya batasan nominal pada tiap level *severity*, Tabel 3 memberikan panduan yang jelas mengenai kapan suatu gangguan harus dianggap berdampak besar walaupun frekuensinya tidak terlalu tinggi. Pendekatan ini penting karena beberapa gangguan dengan frekuensi menengah bisa menimbulkan kerugian energi per kejadian yang jauh lebih besar dibanding jenis gangguan lain. Tabel 3 juga mendorong adanya keterkaitan langsung antara data teknis (ENS) dengan indikator kinerja keuangan, sehingga manajemen dapat melihat dampak gangguan dalam bahasa biaya yang lebih mudah dikomunikasikan. Kriteria yang tercantum dalam Tabel 3 disusun berdasarkan distribusi ENS tahunan di UP3 Makassar Selatan dan dikalibrasi melalui diskusi dengan pihak pemeliharaan dan manajemen aset. Dengan demikian, Tabel 3 tidak hanya menjadi alat klasifikasi dampak, tetapi juga menjadi referensi untuk menyusun target penurunan kerugian energi dalam rencana kerja tahunan. Dalam konteks FMEA, kombinasi nilai *severity* dari Tabel 3 dan nilai *occurrence* dari Tabel 2 menjadi dasar untuk menentukan prioritas tindakan mitigasi yang paling mendesak.

Tabel 3. Kriteria *Severity*

| Level Risiko | Deskripsi Level | Kerugian Pemadaman Akibat Gangguan | Deskripsi Kualitatif |
|--------------|-----------------|------------------------------------|----------------------|
| E | Sangat Besar | > 7 Juta Rupiah | Malapetaka |
| D | Besar | 5 - 7 Juta Rupiah | Signifikan |
| C | Sedang | > 3 - < 5 Juta Rupiah | Medium |
| B | Kecil | 1 - 3 Juta Rupiah | Minor |
| A | Sangat Kecil | < 1 Juta Rupiah | Tidak Signifikan |

Penerapan kriteria dalam Tabel 3 memperlihatkan bahwa beberapa kategori gangguan menempati level *severity* tinggi meskipun tidak selalu yang paling sering terjadi. Misalnya, gangguan petir/cuaca ekstrem dan gangguan yang belum ditemukan tidak hanya sering, tetapi juga menghasilkan kerugian ENS yang besar sehingga banyak kasusnya jatuh pada kategori “besar” hingga “sangat besar” menurut Tabel 3. Sebaliknya, gangguan seperti layangan/balon udara atau sebagian kasus aktivitas manusia tertentu kadang menghasilkan kerugian per kejadian yang relatif kecil sehingga diklasifikasikan pada tingkat *severity* lebih rendah, meskipun tetap perlu dikendalikan dari sisi keselamatan. Melalui Tabel 3, peneliti dapat memisahkan antara gangguan yang sekadar mengganggu operasi sesaat dengan gangguan yang berdampak signifikan pada pasokan di pusat-pusat beban penting. Analisis ini juga mengungkap bahwa beberapa gangguan internal, seperti kerusakan trafo distribusi, walaupun jarang, memiliki potensi kerugian per kejadian yang tidak dapat diabaikan dan karenanya masuk kategori *severity* menengah. Tanpa matriks keparahan yang terstruktur sebagaimana tersaji pada Tabel 3, pengambilan keputusan sering kali hanya mengandalkan intuisi atau pengalaman pribadi. Tabel 3 membantu mengurangi bias tersebut dengan menyediakan batasan kuantitatif yang seragam untuk seluruh jenis gangguan. Hasil klasifikasi ini kemudian berperan langsung dalam pembentukan peta risiko pada Gambar 2, karena nilai *severity* menjadi salah satu sumbu utama dalam matriks risiko. Dengan demikian, kriteria keparahan pada Tabel 3 berfungsi sebagai fondasi penting bagi analisis risiko komprehensif yang menggabungkan aspek teknis dan ekonomi.

Berdasarkan penilaian FMEA, kombinasi nilai *severity* dan *occurrence* menunjukkan bahwa gangguan petir/cuaca ekstrem, gangguan binatang, gangguan batang/ranting pohon, dan gangguan tidak ditemukan berada pada kategori risiko ekstrem, sementara gangguan aktivitas manusia berada pada kategori risiko tinggi, gangguan akibat proteksi berada pada kategori moderat. Gangguan lain seperti masalah konstruksi JTM, titik sambungan konduktor, kabel tanah, trafo distribusi, *switching* LBS/DS/CO, terminasi/*jointing*, layangan/balon udara, dan instalasi milik pelanggan umumnya termasuk kategori moderat hingga rendah.

Setelah skala *occurrence* dan *severity* didefinisikan pada Tabel 2 dan Tabel 3, langkah berikutnya adalah memadukan kedua dimensi tersebut ke dalam suatu representasi visual untuk memudahkan interpretasi. Gambar 2 memperlihatkan peta risiko gangguan jaringan distribusi listrik di UP3 Makassar Selatan tahun 2024 yang disusun dalam bentuk matriks 5×5. Setiap sel pada Gambar 2 merepresentasikan kombinasi tertentu antara frekuensi kejadian dan besarnya dampak, sehingga posisi masing-masing jenis gangguan dapat dibandingkan secara langsung. Melalui peta risiko ini, manajemen dapat segera mengidentifikasi mode kegagalan yang jatuh pada zona “ekstrem”, “tinggi”, “moderat”, maupun “rendah” tanpa harus menelusuri angka-angka rinci satu per satu. Proses penempatan kategori gangguan ke dalam Gambar 2 didasarkan pada hasil perhitungan ENS dan rekap frekuensi tahunan yang sebelumnya telah diklasifikasikan menggunakan Tabel 2 dan Tabel 3. Dengan demikian, Gambar 2 berfungsi sebagai ringkasan visual dari keseluruhan tahapan analisis FMEA yang telah dilakukan. Selain itu, peta risiko dalam Gambar 2 juga memfasilitasi diskusi lintas fungsi antara tim teknik, perencanaan, dan manajemen karena informasi yang disajikan bersifat intuitif dan mudah dipahami. Dari sisi metodologis, penyusunan Gambar 2 memastikan bahwa prioritas penanganan tidak hanya didasarkan pada satu indikator saja, tetapi pada kombinasi yang seimbang antara frekuensi dan keparahan. Oleh karena itu, sebelum memasuki pembahasan strategi mitigasi, Gambar 2 menjadi titik acuan utama untuk menentukan urutan prioritas gangguan yang perlu segera ditangani. Berikut ini merupakan tabel FMEA dari *ID RISK* gangguan jaringan distribusi listrik dapat dilihat pada gambar 2.

| | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|---|----------------------------|----------------|-----------|------------|------------|------------------|
| OCCURRENCE | Sangat Besar | E | E.1 | E.2 | E.3 | E.4 | E.5 | 2 4 6 8 |
| | Besar | D | D.1 | D.2 | D.3 | D.4 | D.5 | |
| | Sedang | C | 15 C.1 | C.2 | C.3 | 5 C.4 | C.5 | |
| | Kecil | B | 1 7 B.1 | 9 11 B.2 | 12 B.3 | B.4 | B.5 | |
| | Sangat Kecil | A | 3 10 13 14 A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | A.5 | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | EKSTREM | | Tidak Signifikan | Minor | Medium | Signifikan | Malapetaka | |
| | TINGGI | | SEVERITY | | | | | |
| | MODERAT | | | | | | | |
| | RENDAH | | | | | | | |

Gambar 2. Peta Risiko Gangguan Jaringan Distribusi UP3 Makassar Selatan tahun 2024

Interpretasi terhadap Gambar 2 menunjukkan bahwa terdapat empat jenis gangguan yang menempati zona risiko ekstrem, yaitu gangguan petir/cuaca ekstrem, gangguan batang/ranting/pohon, gangguan binatang, dan gangguan tidak ditemukan. Keempat kategori ini berada pada kombinasi nilai *occurrence* dan *severity* tertinggi sehingga secara langsung ditetapkan sebagai prioritas utama dalam perencanaan mitigasi. Di bawahnya, Gambar 2 juga menampilkan gangguan aktivitas manusia pada zona risiko tinggi, yang menandakan bahwa meskipun frekuensinya tidak setinggi gangguan ekstrem, dampaknya tetap signifikan bagi kontinuitas pasokan. Sementara itu, gangguan proteksi tercatat pada zona moderat, mengindikasikan perlunya peningkatan pemeliharaan dan koordinasi dengan unit terkait tanpa harus menyerap porsi terbesar dari anggaran mitigasi. Sejumlah gangguan lain seperti konstruksi JTM dan peralatan, titik sambungan konduktor, kabel tanah, trafo distribusi, *switching*, terminasi/*jointing*, layangan/balon udara, dan IML berada pada wilayah risiko rendah hingga menengah, namun tetap memerlukan pemantauan dan tindakan korektif terencana. Melalui Gambar 2, prioritas mitigasi kemudian disusun bertingkat dari prioritas I hingga prioritas VII sesuai dengan posisi masing-masing gangguan di dalam matriks. Pendekatan ini memastikan bahwa sumber daya teknis dan



anggaran diarahkan terlebih dahulu ke mode kegagalan dengan kombinasi dampak dan frekuensi paling berat. Selain itu, peta risiko pada Gambar 2 dapat digunakan sebagai alat evaluasi berkala, apabila program mitigasi berhasil, diharapkan posisi beberapa jenis gangguan pada matriks akan bergeser ke zona risiko yang lebih rendah pada tahun-tahun berikutnya. Dengan demikian, Gambar 2 tidak hanya menggambarkan kondisi risiko saat ini, tetapi juga menjadi instrumen pemantauan keberhasilan strategi pengelolaan gangguan secara berkelanjutan.

Peta risiko 5×5 yang dikembangkan memperlihatkan sebaran risiko berdasarkan frekuensi dan dampak, sehingga memudahkan identifikasi prioritas penanganan bertingkat dari prioritas I hingga VII. Prioritas I ditempati oleh gangguan petir/cuaca ekstrem, diikuti prioritas II gangguan tidak ditemukan, prioritas III gangguan batang/ranting pohon, dan prioritas IV gangguan binatang, sementara prioritas V hingga VII mengelompokkan risiko tinggi hingga rendah lainnya yang tetap memerlukan pengendalian sistematis.

3.3 Strategi Mitigasi dan Kelayakan Biaya

Untuk gangguan petir/cuaca ekstrem, strategi utama adalah penambahan tombak petir di lokasi rawan dan titik yang pernah mengalami gangguan, disertai perbaikan sistem pentanahan pada titik yang nilai tahananannya buruk serta penggantian pentanahan yang hilang. Program ini memerlukan investasi material dan pekerjaan pemasangan, namun secara agregat masih lebih rendah dibandingkan kerugian ENS yang berpotensi muncul jika gangguan serupa dibiarkan berulang tanpa perbaikan proteksi.

Mitigasi gangguan batang/ranting pohon dilakukan melalui pemetaan pohon berdasarkan jenis dan laju pertumbuhan, penentuan prioritas pemangkasan dan penebangan pohon berdiameter besar dan rawan tumbang, serta penyusunan kontrak khusus untuk penebangan pohon yang rawan tumbang kejarjangan dengan dukungan anggaran ROW. Mitigasi gangguan binatang mencakup pemasangan *cover isolator*, *cover cut out*, dan peralatan penyelamat binatang di titik-titik kritis, yang terbukti dalam studi lain mampu menurunkan frekuensi gangguan eksternal secara signifikan.

Gangguan dengan penyebab tidak ditemukan diarahkan pada peningkatan kemampuan penelusuran gangguan melalui upskilling teknisi, pemanfaatan informasi dari masyarakat dan *stakeholder* setempat, serta penguatan mekanisme pelaporan ketika terdengar suara ledakan atau percikan pada jaringan tegangan menengah. Untuk kategori risiko tinggi dan moderat lainnya, tindakan meliputi peningkatan inspeksi berkala, evaluasi beban kabel tanah, perbaikan sambungan dan konstruksi, penyesuaian *setting* proteksi, serta sosialisasi bahaya listrik kepada masyarakat dan pengelola instalasi milik pelanggan yang terhubung langsung dengan jaringan PLN.

Secara keseluruhan, perbandingan antara biaya mitigasi dan kerugian ENS menunjukkan bahwa pelaksanaan paket mitigasi secara bertahap pada risiko ekstrem dan tinggi memberikan manfaat ekonomi bersih, sekaligus meningkatkan keandalan dan citra pelayanan PT. PLN UP3 Makassar Selatan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah di PT PLN Persero UP3 Makassar Selatan sepanjang tahun 2024 menghasilkan kerugian energi yang dapat dikuantifikasi per jenis gangguan, sehingga dampak pemadaman terhadap sistem dan pelanggan dapat dinilai secara terukur. Analisis FMEA dan pemetaan risiko mengidentifikasi bahwa gangguan petir/cuaca ekstrem, batang/ranting pohon, binatang, dan gangguan dengan penyebab belum ditemukan merupakan mode kegagalan dengan risiko tertinggi karena kombinasi ENS besar dan frekuensi kejadian yang tinggi. Integrasi ENS dan FMEA menghasilkan peta risiko yang jelas serta rekomendasi mitigasi berupa peningkatan sistem proteksi petir dan pentanahan, manajemen vegetasi, pemasangan perangkat penyelamat binatang, perbaikan konstruksi dan sambungan, optimalisasi proteksi, dan penguatan sosialisasi, yang diproyeksikan mampu menurunkan frekuensi dan dampak gangguan secara signifikan. Penerapan FMEA sebagai prosedur standar penanganan gangguan serta pemutakhiran berkala dengan skala *severity* dan *occurrence* direkomendasikan untuk menjaga relevansi analisis risiko terhadap dinamika kondisi jaringan.

REFERENCES

- Asgary, A., et al. (2023). *Electrical industry safety risk index (EISRI) using FMEA*. *Heliyon*, 9(2), Article e13345. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13345>
- Billinton, R., & Allan, R. N. (2013). *Reliability evaluation of power systems* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7731-7>
- Fauzy, A. N. R. (2019). *Evaluasi gangguan jaringan distribusi listrik dengan metode Failure Mode Effect Analysis di PT PLN (Persero) Area Surabaya Selatan* [Tesis master's, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. <http://repository.its.ac.id/id/eprint/12345>
- Gumintang, A. (2024). *Identifikasi penyebab dan penurunan susut energi menggunakan FMEA di PT PLN ULP Kangean* [Tesis, Universitas Brawijaya]. <https://repository.ub.ac.id/id/eprint/67890>
- Gupta, P., & Gupta, S. (2020). Risk matrix approach for power system risk evaluation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123, Article 106312. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106312>
- Hariadi, A. (2023). Analisis resiko kegagalan jaringan distribusi dengan Fault Tree Analysis. *IJESPG Journal*. [http://ijespgjournal.org\[index.php/ijespg/article/view/58\[3\]](http://ijespgjournal.org[index.php/ijespg/article/view/58[3])



- Hubbard, D. W. (2020). *The failure of risk management: Why it's broken and how to fix it*. Wiley.
- International Organization for Standardization. (2009). *ISO 31000: Risk management—Principles and guidelines*. <https://www.iso.org/standard/43146.html>
- Kumar, S., et al. (2019). Application of FMEA in power distribution equipment failure analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(5), 1234–1245. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2901234>
- McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2009). *The basics of FMEA* (2nd ed.). CRC Press.
- PT PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan. (2024). *Laporan data gangguan jaringan tegangan menengah tahun 2024*.
- Purba, R., et al. (2018). Penerapan manajemen risiko pada sistem tenaga listrik berbasis standar ISO 31000. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(2), 45–56.
- Purwanto, W., & Setiawan, N. (2022). Sistem tenaga listrik modern dan tantangan keandalan. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*.
- Sari, D., et al. (2021). Analisis gangguan eksternal pada jaringan distribusi di Jawa Barat. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*.
- Singh, B., & Singh, S. (2017). Analysis of distribution system reliability under lightning induced disturbances. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 85, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.08.015>
- Soetadji, P. (2024). Failure mode and effect analysis (FMEA) for periodic maintenance of 20 kV MV switchgear. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 9(4), 123–135. <https://doi.org/10.12962/j2550462.12345>
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- Wibowo, A., et al. (2023). Evaluasi pemasangan penyelamat binatang untuk pengurangan gangguan eksternal pada jaringan distribusi. *Jurnal Ketenagalistrikan Indonesia*.