

Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) pada Penyulang MKN02 dan MKN12 UP3 Surakarta

Kristina Wulandari¹, Fitri Puspasari²

[Submission: 21-05-2026, Accepted: 06-06-2026]

Abstract— The reliability of electric power distribution systems plays an important role in maintaining the continuity of electricity supply to customers, particularly in the 20 kV distribution networks of MKN02 and MKN12 feeders at Mangkunegara Substation located in the central area of Surakarta. This study aims to analyze the reliability of both feeders using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method based on failure rate. The research methodology includes data collection, identification of components and failure modes, calculation of failure rate according to SPLN No. 59 of 1985 and IEEE Std 1366, and evaluation of reliability indices including SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, and ASUI. The results show that MKN02 has a SAIFI value of 2.074 interruptions/customer/year and a SAIDI value of 6.335 hours/customer/year, while MKN12 has values of 0.004 interruptions/customer/year and 0.04 hours/customer/year, indicating that the frequency and duration of interruptions in MKN12 are significantly lower. The CAIDI value of MKN12 is higher (10 hours/interruption) compared to MKN02 (3.054 hours/interruption); however, this difference is not significant due to the very low interruption frequency. Furthermore, the ASAI value of MKN12 is 0.9999954 and the ASUI value is 0.0000046, indicating a system availability level close to a high reliability system. The FMEA analysis identifies critical components in the medium-voltage distribution network (SUTM) with the highest Risk Priority Number (RPN), namely 288 for Line 1-02 and 192 for Line 1-12. Technically, the higher reliability of MKN12 is influenced by its shorter network length and fewer customers. This study provides a reliability evaluation that can serve as a basis for determining maintenance priorities and improving the performance of power distribution networks.

Intisari— Keandalan sistem distribusi tenaga listrik berperan penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan. Khususnya pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang MKN02 dan MKN12 pada GI Mangkunegara yang berada di pusat kota Surakarta. Penelitian ini bertujuan menganalisis keandalan kedua penyulang menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) berbasis *failure rate*. Metode meliputi pengumpulan data, identifikasi komponen dan mode kegagalan, perhitungan *failure rate* berdasarkan SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366, serta evaluasi indeks SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI. Hasil menunjukkan MKN02 memiliki SAIFI 2,074 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI 6,335

jam/pelanggan/tahun, sedangkan MKN12 sebesar 0,004 kali/pelanggan/tahun dan 0,04 jam/pelanggan/tahun, yang berarti frekuensi dan durasi gangguan MKN12 jauh lebih kecil. Nilai CAIDI MKN12 lebih tinggi (10 jam/gangguan) dibanding MKN02 (3,054 jam/gangguan), namun tidak signifikan karena frekuensi gangguan sangat rendah. Nilai ASAI MKN12 sebesar 0,9999954 dan ASUI 0,0000046 menunjukkan tingkat ketersediaan mendekati *high reliability system*. Analisis FMEA menunjukkan komponen kritis pada SUTM dengan RPN tertinggi, yaitu 288 pada Line 1-02 dan 192 pada Line 1-12. Secara teknis, keandalan MKN12 dipengaruhi oleh panjang jaringan lebih pendek dan jumlah pelanggan lebih sedikit. Penelitian ini memberikan evaluasi keandalan sebagai dasar penentuan prioritas pemeliharaan dan peningkatan kinerja jaringan distribusi.

Kata Kunci— keandalan sistem distribusi; FMEA; *failure rate*; indeks keandalan; penyulang 20 kV.

I. PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik memiliki peran penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan sehingga tingkat keandalan jaringan distribusi menjadi salah satu indikator utama dalam menjamin kualitas pelayanan tenaga listrik. Gangguan pada jaringan distribusi dapat menyebabkan pemadaman yang berdampak pada aktivitas masyarakat, sektor industri, dan layanan publik, sehingga diperlukan analisis keandalan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan komponen serta menentukan langkah perbaikan yang tepat [1, 2].

Penelitian ini berfokus pada Penyulang MKN02 dan MKN12 di GI Mangkunegara Surakarta yang menyuplai kawasan dengan aktivitas tinggi dan pelanggan strategis, seperti rumah sakit, pusat perdagangan, stasiun kereta, serta gardu traksi KRL, sehingga membutuhkan tingkat keandalan yang tinggi. Analisis dilakukan menggunakan metode FMEA berbasis *failure rate* dengan acuan standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366 untuk mengevaluasi tingkat kegagalan serta menghitung indeks keandalan SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI. Novelty pada penelitian ini terletak pada penerapan metode FMEA berbasis *failure rate* untuk menganalisis keandalan sistem distribusi 20 kV pada Penyulang MKN02 dan MKN1. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menghitung indeks keandalan SAIFI dan SAIDI, penelitian ini juga menghitung indeks CAIDI, ASAI, dan ASUI serta mengintegrasikan analisis *Risk Priority Number* (RPN) untuk mengidentifikasi

¹Mahasiswa, Jurusan Teknologi Rekayasa Elektro Universitas Gadjah Mada, Gedung SV UGM, Sekip Unit 4 Catur Tunggal Depok Sleman 55281 INDONESIA (telp: +62 (274) 561111; e-mail: kristinawulandari@mail.ac.id)

²Correspondence author, Jurusan Teknologi Rekayasa Elektro Universitas Gadjah Mada, Sekip Unit 4 Catur Tunggal Depok Sleman 55281 INDONESIA (telp: +62 (274) 561111; e-mail: fitri.puspasari@ugm.ac.id)



komponen dengan tingkat risiko gangguan tertinggi. Selain itu, penelitian ini melakukan perbandingan dua penyulang dengan karakteristik pelanggan dan konfigurasi jaringan yang berbeda, yaitu penyulang pelanggan umum dan penyulang gardu traksi KRL, sehingga dapat memberikan evaluasi keandalan yang lebih spesifik terhadap pengaruh panjang jaringan, jumlah pelanggan, dan jenis beban terhadap tingkat keandalan sistem distribusi tenaga listrik. [3, 4].

Implementasi metode FMEA dalam penelitian ini dilakukan dengan mengidentifikasi mode kegagalan pada setiap komponen jaringan distribusi, menghitung nilai *failure rate* dan *repair time*, serta menganalisis tingkat risiko kegagalan menggunakan nilai RPN untuk menentukan prioritas penanganan gangguan dan pemeliharaan sistem distribusi tenaga listrik. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada evaluasi indeks SAIDI dan SAIFI, penelitian ini memberikan evaluasi keandalan melalui identifikasi penyebab gangguan pada setiap komponen jaringan distribusi [5, 6].

Penelitian ini dibatasi pada analisis sistem distribusi 20 kV pada Penyulang MKN02 dan MKN12 tanpa membahas perancangan ulang jaringan maupun faktor eksternal seperti cuaca ekstrem dan gangguan pihak ketiga. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis karakteristik kedua penyulang, menghitung tingkat kegagalan berdasarkan *failure rate*, mengevaluasi indeks keandalan sistem distribusi, serta membandingkan tingkat keandalan antara kedua penyulang. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan studi keandalan sistem distribusi tenaga listrik, membantu identifikasi komponen dengan tingkat kegagalan tertinggi, serta menjadi dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan dan peningkatan keandalan jaringan distribusi tenaga listrik [7, 8].

II. STUDI PUSTAKA

A. Tinjauan Mutakhir

Penelitian mengenai keandalan sistem distribusi tenaga listrik telah banyak dilakukan oleh berbagai peneliti dengan menggunakan beragam metode analisis. Metode yang umum digunakan antara lain analisis indeks keandalan sistem distribusi, pendekatan *failure rate* komponen, serta metode FMEA untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada sistem tenaga listrik. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian ini dirangkum dalam Tabel I untuk memberikan gambaran mengenai metode yang digunakan serta perbandingannya dengan penelitian yang dilakukan pada proyek akhir ini.

B. Literatur.

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan referensi yang berkaitan dengan penelitian melalui jurnal ilmiah, buku teks, standar SPLN No. 59 Tahun 1985, IEEE Std 1366, serta berbagai penelitian terdahulu mengenai keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep sistem distribusi tenaga listrik, karakteristik gangguan pada jaringan distribusi 20 kV, parameter *failure rate* dan *repair time*, serta penerapan metode FMEA dalam analisis keandalan sistem tenaga listrik. Selain itu, kajian literatur juga digunakan untuk mempelajari metode perhitungan indeks

keandalan seperti SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI sebagai parameter evaluasi kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Melalui studi literatur ini diperoleh dasar teori, metode analisis, serta acuan standar yang digunakan dalam proses pengolahan data dan evaluasi tingkat keandalan pada Penyulang MKN02 dan MKN12.

TABEL I
REVIEW PENELITIAN TERDAHULU

Penulis	Judul Penelitian	Tahun	Metode dan Hasil Penelitian
Najib, N. dan Hama [11]	<i>Analysis of Feeder Reliability in a 20 kV Distribution Network System Using the Reliability Network Equivalent Approach</i>	2023	Menganalisis keandalan penyulang 20 kV menggunakan metode RNEA dengan indeks SAIFI dan SAIDI.
Rizki, M., Dewi, A., dan Syofian, A. [12]	<i>Reliability Analysis of Distribution System Using Section Technique and RIA-Section Technique Method</i>	2024	Menggunakan metode <i>Section Technique</i> dan RIA untuk menghitung SAIDI, SAIFI, dan CAIDI.
Widagdo, R. S., Budion, G., dan Slamet, P. [13]	<i>Analysis of the Reliability Index of the Platur Feeder Distribution System</i>	2024	Mengevaluasi keandalan satu penyulang menggunakan SAIDI, SAIFI, dan CAIDI.
Malini R., Barlian, T., dan Lestari, A. [14]	<i>Evaluation of Reliability and Energy Not Supplied in 20 kV Distribution System</i>	2025	Mengevaluasi keandalan dengan SAIDI, SAIFI, dan ENS (<i>Energy Not Supplied</i>).
Prasetya A. M., Sartika, L., dan Muslim, A. H. [15]	<i>Evaluation of 20 kV Distribution System Using SAIDI and SAIFI Reliability Indices</i>	2024	Menganalisis keandalan menggunakan indeks SAIDI dan SAIFI.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang telah dipaparkan pada Tabel I, dapat diketahui bahwa analisis keandalan sistem distribusi tenaga listrik telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan metode, seperti metode *Reliability Network Equivalent Approach* (RNEA), *Section Technique*, *Reliability Index Assessment* (RIA), serta perhitungan indeks keandalan sistem distribusi. Sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada evaluasi kinerja sistem distribusi melalui perhitungan indeks keandalan seperti SAIDI, SAIFI, dan CAIDI untuk mengetahui Tingkat frekuensi dan durasi gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik. Pada proyek akhir ini dilakukan analisis keandalan sistem distribusi dengan menggunakan metode FMEA berbasis *failure rate*. Penelitian ini juga menghitung beberapa indeks keandalan sistem distribusi secara lebih lengkap yaitu SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, dan ASUI. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan evaluasi terhadap tingkat keandalan serta membantu mengidentifikasi penyebab utama gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik.

C. Failure Rate Komponen Sistem Distribusi

Parameter *failure rate* menyatakan jumlah kegagalan suatu komponen dalam satu periode waktu tertentu, yang umumnya dinyatakan dalam satuan kegagalan per tahun [7]. Nilai ini digunakan untuk memperkirakan seberapa sering suatu komponen mengalami gangguan selama periode operasi sistem distribusi. Selain itu, *repair time* menunjukkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen yang mengalami gangguan hingga sistem dapat kembali beroperasi secara normal [10]. Kombinasi antara nilai *failure rate* dan *repair time* digunakan untuk menganalisis frekuensi gangguan serta durasi gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik. Nilai *failure rate* dan *repair time* komponen pada sistem distribusi tegangan menengah yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366 yang ditunjukkan pada Tabel II berikut [4, 5].

TABEL II
FAILURE RATE DAN REPAIR TIME KOMPONEN SISTEM DISTRIBUSI

Komponen	Failure Rate	Repair Time
Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)	0,2/km/tahun	3 jam
Pemutus Tenaga (PMT)	0,004/unit/tahun	10 jam
Load Break Switch (LBS)	0,003/unit/tahun	10 jam
Trafo Distribusi	0,005/unit/tahun	10 jam
Fuse Cut Out (FCO)	0,003/unit/tahun	10 jam

B. Indeks Keandalan

Indeks keandalan sistem distribusi tenaga listrik digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan kontinuitas pelayanan energi listrik kepada pelanggan berdasarkan frekuensi dan durasi gangguan yang terjadi pada sistem distribusi. Parameter indeks keandalan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366, yaitu SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI.

System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) merupakan indeks yang menunjukkan rata-rata frekuensi gangguan yang dialami pelanggan dalam satu tahun. Nilai SAIFI diperoleh dari perbandingan antara jumlah total pelanggan yang mengalami gangguan dengan jumlah total pelanggan yang dilayani sistem distribusi. Berdasarkan standar SPLN No. 59 Tahun 1985, nilai SAIFI yang baik berada di bawah 3,2 kali/pelanggan/tahun, sedangkan menurut IEEE Std 1366 berada di bawah 1,45 kali/pelanggan/tahun. Semakin kecil nilai SAIFI maka semakin jarang pelanggan mengalami pemadaman sehingga tingkat keandalan sistem menjadi lebih baik.

System Average Interruption Duration Index (SAIDI) menunjukkan rata-rata total durasi gangguan yang dialami pelanggan selama satu tahun. Nilai SAIDI digunakan untuk mengetahui lamanya pelanggan kehilangan suplai energi listrik akibat gangguan pada sistem distribusi. Standar SPLN No. 59

tahun 1985 menetapkan nilai SAIDI maksimum sebesar 21 jam/pelanggan/tahun, sedangkan IEEE Std 1366 menetapkan nilai sebesar 2,3 jam/pelanggan/tahun. Semakin kecil nilai SAIDI menunjukkan bahwa durasi pemadaman semakin singkat dan kontinuitas pelayanan listrik semakin baik.

Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI) merupakan indeks yang menunjukkan rata-rata waktu pemulihan gangguan untuk setiap kejadian pemadaman. Nilai CAIDI diperoleh dari perbandingan antara SAIDI dan SAIFI sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi kecepatan penanganan gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik.

Average Service Availability Index (ASAI) merupakan indeks yang menunjukkan tingkat ketersediaan pelayanan energi listrik selama periode tertentu. Nilai ASAI diperoleh dari perbandingan antara total waktu pelayanan sistem dengan total waktu pengamatan dalam satu tahun. Nilai ASAI yang mendekati satu menunjukkan bahwa sistem distribusi memiliki tingkat keandalan yang tinggi dan mampu menyediakan pelayanan energi listrik secara kontinu kepada pelanggan. Sebaliknya, *Average Service Unavailability Index* (ASUI) menunjukkan tingkat ketidaktersediaan pelayanan energi listrik atau proporsi waktu terjadinya gangguan pada sistem distribusi. Nilai ASUI diperoleh dari selisih antara nilai satu dengan ASAI.

Persamaan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (8).

Laju Kegagalan :

$$\lambda_{line} = \lambda_{km} \times L \quad (1)$$

dimana:

U = durasi gangguan (jam/tahun)

λ = jumlah kegagalan (kali/tahun)

r = waktu perbaikan (*repair time*) [10]

Durasi Gangguan :

$$U = \lambda \times r \quad (2)$$

dimana:

U = durasi gangguan (jam/tahun)

λ = jumlah kegagalan (kali/tahun)

r = waktu perbaikan (*repair time*) [10]

SAIFI :

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \times N_i}{\sum N} \quad (3)$$

dimana :

λ_i = Total jumlah kegagalan saluran

N_i = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan

N = Total jumlah pelanggan

SAIDI :

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \times N_i}{\sum N} \quad (4)$$

dimana :

U_i = Durasi gangguan (jam)

N_i = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan

N = Total jumlah pelanggan

CAIDI :



$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (5)$$

ASAI :

$$ASAI = \frac{N_t T \times \sum U_i N_i}{N_t T} \quad (6)$$

$$ASAI = 1 - \frac{SAIDI}{8760} \quad (7)$$

dimana :

U_i = Durasi gangguan (jam)

N_i = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan

N_t = Total jumlah pelanggan

T = Total waktu pengamatan (1 tahun = 8760 jam)

ASUI :

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (8)$$

Perbedaan nilai indeks keandalan pada setiap penyulang dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti panjang jaringan distribusi, jumlah pelanggan, jumlah komponen jaringan, serta karakteristik beban yang dilayani. Penyulang dengan panjang jaringan yang lebih besar memiliki potensi gangguan lebih tinggi karena semakin banyak komponen yang berpotensi mengalami kegagalan. Selain itu, jumlah pelanggan yang lebih besar juga menyebabkan nilai SAIFI dan SAIDI meningkat ketika terjadi gangguan pada sistem distribusi. Berikut pada Tabel 3 merupakan pengaruh parameter penyulang terhadap keandalan.

TABEL III
PENGARUH PARAMETER PENYULANG TERHADAP KEANDALAN

Parameter	Penyulang MKN02	Penyulang MKN12	Pengaruh terhadap Keandalan
Panjang jaringan	± 5,552 km	± 3,17 km	Semakin panjang jaringan, potensi gangguan semakin besar
Jumlah pelanggan	717 pelanggan	1 pelanggan	Jumlah pelanggan besar meningkatkan nilai SAIFI dan SAIDI
Total kegagalan	2,074 kali/tahun	0,648 kali/tahun	Frekuensi gangguan lebih tinggi menyebabkan keandalan menurun
Durasi gangguan	6,335 jam/tahun	2,034 jam/tahun	Durasi gangguan besar meningkatkan nilai SAIDI
Karakteristik beban	Pelanggan umum	Gardu traksi KRL	Beban khusus memiliki sistem proteksi lebih baik
Struktur jaringan	Lebih kompleks	Lebih sederhana	Kompleksitas jaringan meningkatkan risiko gangguan

Berdasarkan data tersebut, Penyulang MKN02 memiliki nilai indeks gangguan yang lebih tinggi dibandingkan Penyulang MKN12 karena memiliki panjang jaringan lebih besar, jumlah pelanggan lebih banyak, serta struktur jaringan yang lebih kompleks. Sebaliknya, Penyulang MKN12 memiliki tingkat keandalan lebih baik karena jaringan lebih pendek, jumlah pelanggan lebih sedikit, dan menggunakan sistem distribusi dengan karakteristik beban khusus sehingga frekuensi gangguan relatif lebih rendah.

III. METODOLOGI

Metode penelitian merupakan langkah sistematis yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian serta menjawab rumusan masalah yang telah dirumuskan. Metode inti yang digunakan dalam penelitian ini adalah FMEA berbasis *failure rate* untuk menganalisis tingkat keandalan sistem distribusi 20 kV pada Penyulang MKN02 dan MKN12. Metode FMEA digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada setiap komponen jaringan distribusi, menganalisis dampak gangguan yang ditimbulkan, serta menentukan tingkat risiko kegagalan melalui nilai RPN. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *failure rate* dan *repair time* berdasarkan standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366 untuk memperoleh indeks keandalan sistem distribusi yang meliputi SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI.

Proses penelitian diawali dengan pengumpulan informasi melalui studi literatur dan kajian dasar teori yang relevan. Tahap selanjutnya adalah pengumpulan dan pengolahan data gangguan pada Penyulang MKN02 dan MKN12 di Gardu Induk Mangkunegara. Berdasarkan data tersebut kemudian dilakukan perhitungan indeks keandalan sistem distribusi. Hasil perhitungan selanjutnya dianalisis untuk mengetahui tingkat keandalan sistem distribusi serta membandingkan kinerja keandalan kedua penyulang yang diteliti. Seluruh tahapan penelitian tersebut divisualisasikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 1 untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai prosedur penelitian yang dilakukan.

Tahapan penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

A. Penentuan Objek Penelitian

Objek penelitian yang digunakan adalah Penyulang MKN02 dan Penyulang MKN12 yang berasal dari Gardu Induk Mangkunegara. Pemilihan kedua penyulang ini didasarkan pada perbedaan karakteristik jaringan dan beban yang dilayani sehingga dapat dilakukan analisis perbandingan keandalan.

B. Pengumpulan Data Penyulang

Pengumpulan data dilakukan secara terpisah untuk masing-masing penyulang, yaitu penyulang MKN02 dan MKN12. Data yang dikumpulkan meliputi konfigurasi jaringan, panjang saluran, jumlah dan jenis komponen, jumlah pelanggan, serta data standar *failure rate* dan *repair time*.

C. Pembagian Section Jaringan Penyulang

Pada tahap ini dilakukan pembagian jaringan untuk masing-masing penyulang menjadi beberapa *section* untuk penyulang MKN02 dan MKN12. Pembagian ini bertujuan untuk



Gambar 1: Diagram Alir Metode Penelitian

Tahapan analisis FMEA berbasis nilai RPN ditunjukkan pada diagram alir Gambar 2 berikut.

D. Penentuan Nilai Tingkat Kegagalan (*Failure Rate*)

Dilakukan perhitungan nilai *failure rate* pada masing-masing *section* untuk kedua penyulang berdasarkan data komponen dan panjang saluran. Perhitungan ini mengacu pada standar SPLN dan IEEE.

E. Perhitungan Nilai Durasi Gangguan

Tahap ini dilakukan dengan menghitung durasi gangguan tahunan berdasarkan nilai *failure rate* dan *repair time* pada masing-masing komponen untuk :

- Data jaringan penyulang MKN02 dan MKN12 GI Mangkunegara
- Data jumlah beban tiap load point serta jumlah pelanggan pada penyulang
- MKN02 dan MKN12
- Standar dan pedoman keandalan (SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366)

- Standar nilai *failure rate* saluran udara tegangan menengah
- Literatur dan jurnal ilmiah terkait keandalan sistem distribusi tenaga listrik
- Single Line Diagram penyulang MKN02 dan MKN12



Gambar 2 : Diagram Alir Analisis FMEA

F. Perhitungan Indeks Keandalan Penyulang

Selanjutnya dilakukan perhitungan indeks keandalan untuk masing-masing penyulang yang meliputi SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI dan ASUI.

G. Analisis dan Perbandingan Keandalan Penyulang

Hasil perhitungan indeks keandalan dari kedua penyulang dianalisis dan dibandingkan untuk mengetahui perbedaan tingkat keandalan berdasarkan karakteristik jaringan, jumlah pelanggan, serta struktur sistem distribusi.

H. Penarikan Kesimpulan

Tahap terakhir adalah menarik kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan serta memberikan rekomendasi untuk peningkatan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil analisis keandalan sistem distribusi 20 kV pada Penyulang MKN02 dan MKN12. Analisis dilakukan menggunakan metode FMEA serta perhitungan indeks keandalan berdasarkan standar yang berlaku. Hasil yang diperoleh selanjutnya dibahas untuk mengidentifikasi tingkat kegagalan komponen, mengevaluasi kinerja sistem, serta membandingkan keandalan kedua penyulang berdasarkan karakteristik pelanggan yang berbeda..

A. Gambaran Umum Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah sistem distribusi tenaga listrik 20 kV dari GI Mangkunegara, PT PLN (Persero) UP3 Surakarta



berlokasi di Jl. Yosodipuro No.15, Timuran, Kecamatan Banjarsari, Kota Surakarta, Jawa Tengah. Analisis difokuskan pada Penyulang MKN02 yang melayani pelanggan umum dan Penyulang MKN12 yang menyuplai gardu traksi KRL Solo-Jebres. Untuk mempermudah analisis, jaringan dibagi menjadi beberapa *section* berdasarkan peralatan proteksi. Data yang digunakan meliputi konfigurasi jaringan, jumlah pelanggan, dan komponen sistem, yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode FMEA serta indeks keandalan untuk mengevaluasi kinerja sistem dan mengidentifikasi potensi kegagalan.

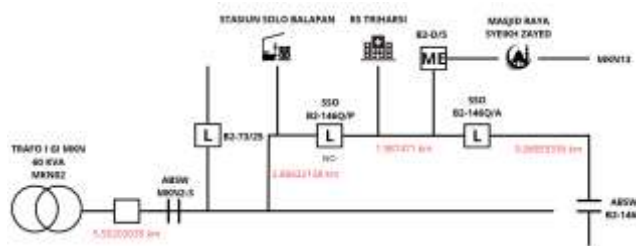
B. Data Pembagian *Section* dan Saluran Jaringan Penyulang

Pada bagian ini disajikan data pembagian *section* serta konfigurasi saluran jaringan pada Penyulang MKN02 dan MKN12. Pembagian *section* dilakukan berdasarkan lokasi peralatan proteksi dan titik pemisah jaringan untuk mempermudah analisis gangguan. Data tersebut disajikan dalam bentuk Tabel III sebagai berikut.

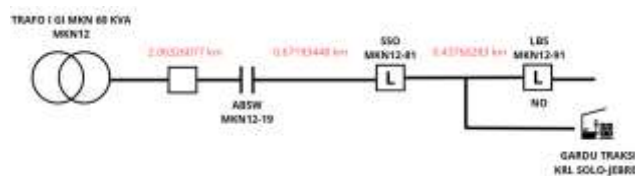
TABEL IV
PEMBAGIAN *SECTION* DAN PANJANG SALURAN PENYULANG

PENYULANG MKN02				
Section	Panjang (km)	Batas Awal	Batas Akhir	Peralatan Pembatas
Section 1-02 (Line 1-02)	5,552	PMT GI Mangku negara	ABSW MKN2-3	PMT – Air Break Switch
Section 2-02 (Line 2-02)	2,684	ABSW MKN2-3	SSO B2-146Q/P	ABSW – Section Switch
Section 3-02 (Line 3-02)	1,987	SSO B2-146Q/P	SSO B2-146Q/A	Section Switch – Section Switch
Section 4-02 (Line 4-02)	0,069	SSO B2-146Q/A	ABSW NO B2-146D	Section Switch – Air Break Switch (NO)
PENYULANG MKN12				
Section	Panjang (km)	Batas Awal	Batas Akhir	Peralatan Pembatas
Section 1-12 (Line 1-12)	2,063	PMT GI Mangku negara	ABSW MKN12-19	PMT – Air Break Switch
Section 2-12 (Line 2-12)	0,672	ABSW MKN12-19	SSO MKN12-81	ABSW – Section Switch
Section 3-12 (Line 3-12)	0,438	SSO MKN12-81	LBS NO MKN12-91	Section Switch – Load Break Switch (NO)

Ilustrasi *Single Line Diagram* pembagian *section* pada penyulang MKN02 dan MKN12 ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4 berikut.



Gambar 3 : *Single Line Diagram* Penyulang MKN02



Gambar 4 : *Single Line Diagram* Penyulang MKN12

C. Data Beban dan Pelanggan Penyulang

Data pembebanan pada setiap load point dan jumlah pelanggan pada Penyulang MKN02 dan MKN12 digunakan sebagai dasar dalam perhitungan indeks keandalan sistem distribusi. Nilai beban dan jumlah pelanggan pada masing-masing load point berpengaruh terhadap besarnya dampak gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik. Data tersebut selanjutnya digunakan dalam proses perhitungan indeks keandalan seperti SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI dengan mempertimbangkan jumlah pelanggan terdampak, nilai *failure rate*, serta durasi gangguan pada setiap *section* jaringan.

Langkah perhitungan dilakukan dengan menentukan jumlah pelanggan pada setiap load point, kemudian menghitung frekuensi gangguan tahunan berdasarkan nilai *failure rate* komponen dan panjang saluran distribusi. Selanjutnya dihitung durasi gangguan tahunan menggunakan nilai *repair time* pada masing-masing komponen. Tabel V berikut menunjukkan data pembebanan dan jumlah pelanggan pada setiap *load point* Penyulang MKN02 dan MKN12.

TABEL V
DATA PEMBEBANAN DAN PELANGGAN SETIAP *LOAD POINT*

PENYULANG MKN02		
Load Point	Beban (kVA)	Jumlah Pelanggan
LP01	29,6	24
LP02	36,5	16
LP03	17,6	1
LP04	65	31
LP05	30,5	17
LP06	37,3	32
LP07	12,75	3
LP08	52,95	25
LP09	24,9	2
LP10	51,35	20
LP11	3,5	1
LP12	92,4	13
LP13	33	1
LP14	59,95	34
LP15	117	7
LP16	50,4	24

LP17	53,9	10
LP18	290,873	43
LP19	44	2
LP20	50,8	33
LP21	28,6	7
LP22	100,1	72
LP23	30,45	23
LP24	4,5	5
LP25	5,5	1
LP26	23,5	19
LP27	8,4	6
LP28	5,3	5
LP29	66	1
LP30	67,4	30
LP31	17,6	1
LP32	47,3	16
LP33	20	4
LP34	2,2	1
LP35	41,5	1
LP36	33	1
LP37	8,4	5
LP38	161,7	124
LP39	58,5	56
TOTAL PELANGGAN		717
PENYULANG MKN12		
Load Point	Beban (kVA)	Jumlah Pelanggan
LP01-12	5540	1
TOTAL PELANGGAN		1

D. Perhitungan Kegagalan (*Failure Rate*) dan Durasi Padam Menggunakan Metode FMEA

Parameter dalam analisis keandalan meliputi *failure rate*, jumlah kegagalan, *repair time*, dan durasi gangguan tahunan. Parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan frekuensi kegagalan komponen serta waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan sistem ke kondisi normal. Nilai *failure rate* dan *repair time* pada penelitian ini mengacu pada standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366 sebagai acuan evaluasi keandalan sistem distribusi [4, 5]. Pada komponen peralatan seperti Pemutus Tenaga (PMT), *Air Break Switch* (ABSW), dan *Sectionalizer Switch Off* (SSO), jumlah kegagalan tahunan diasumsikan sama dengan nilai *failure rate*. Berbeda dengan itu, pada saluran distribusi, jumlah kegagalan dipengaruhi oleh panjang jaringan sehingga dihitung dari perkalian *failure rate* per kilometer dengan panjang saluran. Pendekatan ini umum digunakan karena semakin panjang jaringan, semakin tinggi potensi gangguan. Selanjutnya, durasi gangguan tahunan diperoleh dari hasil perkalian jumlah kegagalan dengan *repair time*. Nilai ini menggambarkan total waktu padam dalam satu tahun dan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan indeks keandalan seperti SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI [3]. Tabel VI berikut menunjukkan nilai *failure rate*, jumlah kegagalan tahunan, serta durasi gangguan pada penyulang MKN02 dan MKN12.

TABEL VI
NILAI *FAILURE RATE* DAN DURASI GANGGUAN PENYULANG

PENYULANG MKN02					
Komponen	Panjang (km)	Failure Rate	Kegagalan (kali/tahun)	Repair Time (jam)	Durasi (jam/tahun)
PMT GI Mangkumegara	-	0,004	0,004	10	0,04
ABSW MKN2-3	-	0,003	0,003	10	0,03
SSO B2-146Q/P	-	0,003	0,003	10	0,03
SSO B2-146Q/A	-	0,003	0,003	10	0,03
ABSW NO B2-146D	-	0,003	0,003	10	0,03
Line 1-02	5,552	0,2	1,110	3	3,331
Line 2-02	2,684	0,2	0,537	3	1,611
Line 3-02	1,987	0,2	0,397	3	1,192
Line 4-02	0,069	0,2	0,014	3	0,041
TOTAL			2,074		6,335
PENYULANG MKN12					
Komponen	Panjang (km)	Failure Rate	Kegagalan (kali/tahun)	Repair Time (jam)	Durasi (jam/tahun)
PMT GI Mangkumegara	-	0,004	0,004	10	0,04
ABSW MKN12-19	-	0,003	0,003	10	0,03
SSO MKN12-81	-	0,003	0,003	10	0,03
LBS NO MKN12-91	-	0,003	0,003	10	0,03
Line 1-12	2,063	0,2	0,413	3	1,238
Line 2-12	0,672	0,2	0,134	3	0,403
Line 3-12	0,438	0,2	0,088	3	0,263
TOTAL			0,648		2,034

Contoh Perhitungan :

Perhitungan jumlah kegagalan saluran menggunakan Persamaan (1) [4-6]. Sebagai contoh untuk Line 1-02 :

$$\begin{aligned}\lambda_{line} &= \lambda_{km} \times L \\ \lambda_{line} &= 0,2 \times 5,552 \\ \lambda_{line} &= 1,110 \text{ kali/tahun}\end{aligned}\quad (1)$$

dimana :

λ_{line} = jumlah kegagalan saluran (kali/tahun)

λ_{km} = *failure rate* saluran per km (SPLN/IEEE) [4, 5]

L = panjang saluran (km)



Durasi gangguan tahunan dihitung dengan Persamaan (2) [5, 7, 10]. Sehingga durasi gangguan *Line* 1-02 adalah :

$$\begin{aligned} U &= \lambda \times r \\ U &= 1,1104 \times 3 \\ U &= 3,331 \text{ jam/tahun} \end{aligned} \quad (2)$$

dimana:

U = durasi gangguan (jam/tahun)

λ = jumlah kegagalan (kali/tahun)

r = waktu perbaikan (*repair time*) [10]

E. Perhitungan Indeks Keandalan Sistem Distribusi

Perhitungan indeks keandalan digunakan untuk mengevaluasi kontinuitas pelayanan listrik berdasarkan frekuensi dan durasi gangguan. Penelitian ini menggunakan indeks SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, dan ASUI yang dihitung berdasarkan jumlah kegagalan, durasi gangguan, dan jumlah pelanggan pada setiap *load point*. Nilai tersebut diperoleh dari analisis *failure rate* dan digabungkan untuk menentukan tingkat keandalan sistem distribusi secara keseluruhan. Tabel VII berikut menunjukkan perhitungan indeks kegagalan penyulang MKN02 dan MKN12.

TABEL VII
HASIL PERHITUNGAN INDEKS KEANDALAN PENYULANG

PENYULANG MKN02					
Load Point	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ASUI
LP01	0,0694	0,2121	3,054	0,99997	0,000024
LP02	0,0463	0,1414	3,054	0,99998	0,000016
LP03	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP04	0,0897	0,2739	3,054	0,99996	0,000031
LP05	0,0492	0,1502	3,054	0,99998	0,000017
LP06	0,0926	0,2828	3,054	0,99996	0,000032
LP07	0,0087	0,0265	3,054	1,00000	0,000000
LP08	0,0723	0,2209	3,054	0,99997	0,000025
LP09	0,0058	0,0177	3,054	0,99999	0,000002
LP10	0,0579	0,1767	3,054	0,99998	0,000020
LP11	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP12	0,0376	0,1149	3,054	0,99998	0,000013
LP13	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP14	0,0984	0,3004	3,054	0,99996	0,000034
LP15	0,0203	0,0619	3,054	0,99999	0,000007
LP16	0,0694	0,2121	3,054	0,99997	0,000024
LP17	0,0289	0,0884	3,054	0,99999	0,000010
LP18	0,1244	0,3799	3,054	0,99995	0,000043
LP19	0,0058	0,0177	3,054	0,99999	0,000002
LP20	0,0955	0,2916	3,054	0,99996	0,000033
LP21	0,0203	0,0619	3,054	0,99999	0,000007
LP22	0,2083	0,6362	3,054	0,99992	0,000073
LP23	0,0665	0,2032	3,054	0,99997	0,000023
LP24	0,0145	0,0442	3,054	0,99999	0,000005
LP25	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP26	0,0550	0,1679	3,054	0,99998	0,000019
LP27	0,0174	0,0530	3,054	0,99999	0,000006
LP28	0,0145	0,0442	3,054	0,99999	0,000005
LP29	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP30	0,0868	0,2651	3,054	0,99997	0,000030
LP31	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP32	0,0463	0,1414	3,054	0,99998	0,000016
LP33	0,0116	0,0353	3,054	0,99999	0,000004
LP34	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP35	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001

LP36	0,0029	0,0088	3,054	0,99999	0,000001
LP37	0,0145	0,0442	3,054	0,99999	0,000005
LP38	0,3588	1,0957	3,054	0,99987	0,000125
LP39	0,1620	0,4948	3,054	0,99994	0,000056
TOT AL	2,0745	6,3354	3,054	0,99927	0,000723
PENYULANG MKN12					
Load Point	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ASUI
LP01-12	0,0004	0,04	10	0,99999	0,0000046
TOT AL	0,0004	0,04	10	0,99999	0,0000046

Berdasarkan Tabel VI, diketahui bahwa jumlah pelanggan pada penyulang MKN02 sebanyak 717 pelanggan dengan nilai indeks keandalan berupa SAIFI sebesar 2,0745 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI sebesar 6,3354 jam/pelanggan/tahun. Nilai CAIDI sebesar 3,054 jam/gangguan menunjukkan rata-rata durasi pemulihan setiap terjadi gangguan. Sementara itu, nilai ASAI sebesar 0,99927 menunjukkan bahwa tingkat ketersediaan pelayanan energi listrik pada penyulang ini mencapai lebih dari 99,9% dalam satu tahun, dengan nilai ASUI sebesar 0,000723 yang menandakan tingkat ketidakterediaan yang sangat rendah.

Pada penyulang MKN12, nilai SAIFI sebesar 0,0004 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI sebesar 0,04 jam/pelanggan/tahun menunjukkan frekuensi dan durasi gangguan yang sangat kecil. Nilai CAIDI sebesar 10 jam/gangguan mengindikasikan waktu pemulihan yang relatif lebih lama pada setiap kejadian gangguan. Namun demikian, nilai ASAI sebesar 0,99999 menunjukkan bahwa tingkat ketersediaan pelayanan listrik tetap sangat tinggi, dengan nilai ASUI sebesar 0,0000046 yang sangat kecil. Secara umum, semakin kecil nilai ASUI, maka semakin baik tingkat keandalan sistem distribusi yang dianalisis.

Contoh Perhitungan :

Sebagai contoh, perhitungan SAIFI pada LP01 menggunakan Persamaan (3) [4,5,7].

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \times N_i}{\sum N} \quad (3)$$

$$SAIFI = \frac{2,074463218 \times 24}{717}$$

$$SAIFI = 0,0694 \text{ kali/pelanggan/tahun}$$

dimana :

λ_i = Total jumlah kegagalan saluran

N_i = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan

N = Total jumlah pelanggan

Perhitungan SAIDI pada LP01 menggunakan Persamaan (4) [4,5,7].

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \times N_i}{\sum N} \quad (4)$$

$$SAIDI = \frac{6,335389654 \times 24}{717}$$

$$SAIDI = 0,2121 \text{ jam/pelanggan/tahun}$$

dimana :

U_i = Durasi gangguan (jam)

N_i = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan

N = Total jumlah pelanggan

Selanjutnya nilai CAIDI dihitung menggunakan Persamaan (5) [1,5,7].

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (5)$$

$$CAIDI = \frac{0,2121}{0,0694}$$

$$CAIDI = 3,054 \text{ jam/gangguan}$$

Perhitungan ASAI dilakukan dengan membandingkan total waktu pelayanan sistem terhadap total waktu pengamatan dalam satu tahun. Total waktu dalam satu tahun adalah 8760 jam. Nilai ASAI dapat dihitung menggunakan Persamaan (6) atau (7) sebagai berikut [1,5].

$$ASAI = \frac{N_t T \times \sum U_i N_i}{N_t T} \quad (6)$$

$$ASAI = 1 - \frac{SAIDI}{8760} \quad (7)$$

$$ASAI = 1 - \frac{6,335389654}{8760}$$

$$ASAI = 1 - 0,000723218$$

$$ASAI = 0,999276782$$

dimana :

U_i = Durasi gangguan (jam)

N_i = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan

N_t = Total jumlah pelanggan

T = Total waktu pengamatan (1 tahun = 8760 jam)

Nilai ASAI yang mendekati 1 menunjukkan bahwa tingkat ketersediaan pelayanan listrik pada penyulang MKN02 sangat tinggi, dimana sistem mampu menyediakan pelayanan energi listrik selama lebih dari 99,9% dari total waktu dalam satu tahun. Selanjutnya nilai ASUI dihitung menggunakan Persamaan (8) dengan menggunakan nilai ASAI yang telah diperoleh sebelumnya [4,6].

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (8)$$

$$ASUI = 1 - 0,999276782$$

$$ASUI = 0,000723218$$

F. Perbandingan Indeks Keandalan Penyulang MKN02 dan MKN12

Hasil analisis menunjukkan bahwa penyulang MKN02 memiliki total kegagalan sebesar 2,074 kali/tahun dengan total durasi gangguan sebesar 6,335 jam/tahun. Nilai kegagalan terbesar berasal dari komponen saluran distribusi, khususnya pada *Line* 1-02 yang memiliki panjang jaringan paling besar yaitu sekitar 5,552 km. Kondisi ini menunjukkan bahwa panjang jaringan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tingkat kegagalan sistem distribusi. Semakin panjang jaringan distribusi, maka semakin besar pula potensi terjadinya gangguan yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti kondisi lingkungan, gangguan vegetasi, cuaca, maupun aktivitas manusia di sekitar jaringan distribusi [1,2]. Perbandingan indeks keandalan penyulang MKN02 dan MKN12 secara visual dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5 : Grafik Perbandingan Indeks Keandalan Penyulang MKN02 dan MKN12

Jika ditinjau dari hasil perhitungan indeks keandalan, penyulang MKN02 memiliki nilai SAIFI sebesar 2,074 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI sebesar 6,335 jam/pelanggan/tahun. Nilai SAIFI tersebut menunjukkan bahwa secara rata-rata setiap pelanggan pada penyulang MKN02 mengalami gangguan sekitar dua kali dalam satu tahun. Sementara itu, nilai SAIDI menunjukkan bahwa total durasi gangguan yang dialami pelanggan dalam satu tahun adalah sekitar 6,3 jam. Nilai CAIDI yang diperoleh sebesar 3,054 jam/gangguan menunjukkan bahwa setiap kejadian gangguan membutuhkan waktu pemulihan rata-rata sekitar tiga jam hingga sistem kembali beroperasi normal. Selain itu, nilai ASAI pada penyulang MKN02 sebesar 0,9992768 menunjukkan bahwa tingkat ketersediaan pelayanan energi listrik pada penyulang ini mencapai lebih dari 99,9% dalam satu tahun. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat beberapa kejadian gangguan pada jaringan distribusi, secara keseluruhan sistem masih mampu memberikan kontinuitas pelayanan energi listrik dengan tingkat keandalan yang cukup tinggi. Nilai ASUI yang sangat kecil yaitu sebesar 0,0007232 juga menunjukkan bahwa proporsi waktu ketidaktersediaan

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



pelayanan listrik relatif kecil dibandingkan dengan total waktu operasi sistem dalam satu tahun [3].

Berbeda dengan penyulang MKN02, penyulang MKN12 memiliki karakteristik sistem yang lebih sederhana dengan panjang jaringan yang lebih pendek serta jumlah pelanggan yang jauh lebih sedikit. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total kegagalan pada penyulang MKN12 sebesar 0,648 kali/tahun dengan total durasi gangguan sebesar 2,034 jam/tahun. Nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan penyulang MKN02 karena panjang jaringan penyulang MKN12 hanya sekitar 3,17 km sehingga potensi terjadinya gangguan pada saluran distribusi juga lebih rendah [2]. Pada perhitungan indeks keandalan, penyulang MKN12 memiliki nilai SAIFI sebesar 0,004 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI sebesar 0,04 jam/pelanggan/tahun. Nilai tersebut menunjukkan bahwa frekuensi gangguan yang dialami pelanggan pada penyulang ini sangat kecil. Dengan kata lain, gangguan pada penyulang MKN12 hampir tidak terjadi dalam satu tahun operasi sistem.

Nilai CAIDI sebesar 10 jam/gangguan menunjukkan bahwa apabila terjadi gangguan, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan relatif lebih lama dibandingkan dengan penyulang MKN02. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik penyulang yang melayani pelanggan khusus dengan kebutuhan daya besar, sehingga proses penanganan gangguan harus dilakukan secara lebih hati-hati untuk menjaga keamanan dan kestabilan sistem tenaga listrik. Nilai ASAI pada penyulang MKN12 sebesar 0,9999954 menunjukkan bahwa tingkat ketersediaan pelayanan energi listrik pada penyulang ini sangat tinggi, bahkan lebih tinggi dibandingkan dengan penyulang MKN02. Hal ini menunjukkan bahwa sistem distribusi pada penyulang MKN12 memiliki Tingkat keandalan yang sangat baik dalam mendukung kontinuitas suplai listrik bagi gardu traksi KRL Solo-Jebres. Mengingat peran gardu traksi tersebut sangat penting dalam mendukung operasional sistem transportasi kereta rel listrik, maka tingkat keandalan yang tinggi pada penyulang ini menjadi sangat krusial.

G. Data Gangguan Aktual

Data gangguan aktual komponen PMT dan LBS pada GI Mangkunegara ditunjukkan pada Tabel VIII dan Tabel IX berikut.

TABEL VIII
DATA GANGGUAN AKTUAL KOMPONEN PMT

Feeder	Tanggal	Durasi	Daya Hilang (kW)
MKN02	10 Feb 2025	65	2107,82
MKN02	18 Feb 2025	61	4146,53
MKN02	5 Mei 2025	83	4388,41
MKN02	7 Mei 2025	209	3282,67
MKN02	4 Jun 2025	70	2695,24
MKN02	15 Jun 2025	44	3109,90
MKN02	26 Sep 2025	65	2660,69
MKN02	5 Nov 2025	83	4561,18

TABEL IX
DATA GANGGUAN AKTUAL KOMPONEN LBS

Feeder	Tanggal	Durasi	Daya Hilang (kW)
MKN02	7 Mei 2025	217	1278,51

H. Perbandingan Indeks Keandalan dengan Standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366

Perbandingan antara nilai indeks keandalan hasil perhitungan dengan nilai standar SPLN No. 59 Tahun 1985 dan IEEE Std 1366 ditunjukkan pada Tabel X berikut.

TABEL X
PERBANDINGAN INDEKS KEANDALAN PENYULANG DENGAN SPLN DAN IEEE

Indeks	MKN02	MKN12	SPLN	IEEE
SAIFI	2,074	0,004	3,2	1,45
SAIDI	6,335	0,04	21,0	2,3
CAIDI	3,054	10	-	1,47
ASAI	0,9992768	0,9999954	6,56	≈0,999
ASUI	0,0007232	0,0000046	-	≈0

Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, nilai SAIFI pada penyulang MKN02 masih berada di bawah batas maksimum standar SPLN No. 59 Tahun 1985 yaitu 3,2 kali/pelanggan/tahun sehingga dapat dikategorikan masih memenuhi standar keandalan yang ditetapkan. Namun jika dibandingkan dengan standar IEEE 1366, nilai SAIFI tersebut masih sedikit lebih tinggi sehingga menunjukkan bahwa frekuensi gangguan pada penyulang MKN02 masih dapat ditingkatkan [5]. Sebaliknya, nilai SAIFI pada penyulang MKN12 jauh lebih kecil dibandingkan dengan kedua standar tersebut sehingga menunjukkan tingkat keandalan yang sangat baik. Pada indeks SAIDI, nilai pada penyulang MKN02 masih berada di bawah batas maksimum standar SPLN No. 59 Tahun 1985, namun masih lebih besar dibandingkan standar IEEE Std 1366. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun frekuensi gangguan relatif masih dalam batas yang dapat diterima, durasi pemulihan gangguan pada penyulang MKN02 masih dapat ditingkatkan agar waktu pemadaman pelanggan menjadi lebih singkat [3]. Sebaliknya, nilai SAIDI pada penyulang MKN12 sangat kecil sehingga kontinuitas pelayanan listrik pada penyulang tersebut dapat dikategorikan sangat baik.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penyulang MKN12 memiliki tingkat keandalan yang lebih baik dibandingkan dengan penyulang MKN02. Perbedaan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain panjang jaringan distribusi, jumlah pelanggan yang dilayani, serta karakteristik sistem pada masing-masing penyulang. Penyulang dengan jaringan yang lebih panjang dan jumlah pelanggan yang lebih banyak cenderung memiliki risiko gangguan yang lebih besar dibandingkan dengan penyulang yang memiliki konfigurasi jaringan lebih sederhana [1, 2]. Dengan demikian, untuk meningkatkan tingkat keandalan pada penyulang seperti MKN02 diperlukan upaya peningkatan pemeliharaan jaringan distribusi, pengelolaan vegetasi di sekitar jaringan, serta peningkatan sistem proteksi dan manuver jaringan agar gangguan yang terjadi dapat ditangani dengan lebih cepat dan dampaknya terhadap pelanggan dapat diminimalkan.

I. Analisis Akar Penyebab Gangguan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode FMEA, diketahui bahwa gangguan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang MKN02 dan MKN12 didominasi oleh gangguan pada SUTM. Komponen saluran distribusi memiliki nilai *failure rate* paling besar dibandingkan komponen proteksi lainnya karena dipengaruhi oleh panjang jaringan yang lebih besar serta kondisi lingkungan di sekitar jaringan distribusi.

Pada Penyulang MKN02, nilai kegagalan tertinggi terjadi pada *Line* 1-02 dengan nilai RPN terbesar. Kondisi ini menunjukkan bahwa section tersebut memiliki tingkat risiko gangguan paling tinggi dibandingkan section lainnya. Akar penyebab gangguan pada saluran distribusi umumnya disebabkan oleh faktor lingkungan seperti pohon atau vegetasi yang mendekati jaringan, gangguan cuaca berupa hujan dan angin kencang, serta gangguan eksternal akibat aktivitas manusia di sekitar jaringan distribusi. Selain itu, panjang jaringan yang mencapai 5,552 km menyebabkan potensi terjadinya gangguan menjadi lebih besar dibandingkan *section* lainnya.

Sementara itu, pada Penyulang MKN12 tingkat gangguan relatif lebih kecil karena panjang jaringan lebih pendek dan jumlah pelanggan lebih sedikit. Namun demikian, potensi gangguan tetap dapat terjadi akibat gangguan pada peralatan proteksi seperti PMT, ABSW, dan SSO yang dapat menyebabkan terhentinya penyaluran energi listrik pada gardu traksi KRL. Waktu pemulihan gangguan pada penyulang ini juga relatif lebih lama karena proses penanganan harus dilakukan secara hati-hati untuk menjaga kestabilan sistem dan kontinuitas suplai pada beban prioritas.

Berdasarkan analisis akar penyebab tersebut, upaya peningkatan keandalan sistem distribusi dapat dilakukan melalui pemeliharaan rutin jaringan distribusi, pemangkasan vegetasi di sekitar saluran udara, pemeriksaan berkala pada peralatan proteksi, serta peningkatan sistem manuver jaringan untuk mempercepat proses pemulihan ketika terjadi gangguan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis keandalan sistem distribusi tenaga listrik menggunakan metode FMEA, diperoleh bahwa Penyulang MKN02 dan MKN12 memiliki karakteristik yang berbeda signifikan. Penyulang MKN02 melayani 717 pelanggan dengan beban tegangan rendah dan menengah sehingga memiliki potensi gangguan lebih tinggi, sedangkan Penyulang MKN12 hanya menyuplai gardu traksi KRL dengan konfigurasi jaringan lebih sederhana. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Penyulang MKN02 memiliki total kegagalan sebesar 2,074 kali/tahun dengan durasi gangguan 6,335 jam/tahun, sedangkan MKN12 sebesar 0,648 kali/tahun dan 2,034 jam/tahun, sehingga frekuensi dan durasi gangguan MKN12 masing-masing lebih rendah sekitar 68,7% dan 67,9%. Nilai indeks keandalan MKN02 yaitu SAIFI 2,074 kali/pelanggan/tahun, SAIDI 6,335 jam/pelanggan/ tahun, dan

CAIDI 3,054 jam/gangguan, sedangkan MKN12 memiliki SAIFI 0,004 kali/pelanggan/tahun, SAIDI 0,04 jam/pelanggan/tahun, dan CAIDI 10 jam/gangguan. Selain itu, MKN12 memiliki nilai ASAI sebesar 0,9999954 dan ASUI sebesar 0,0000046 yang menunjukkan tingkat keandalan sangat tinggi. Berdasarkan standar SPLN No. 59 Tahun 1985, kedua penyulang masih memenuhi standar karena nilai SAIFI dan SAIDI berada di bawah batas yang ditentukan, namun berdasarkan IEEE Std 1366 hanya Penyulang MKN12 yang memenuhi standar, sedangkan MKN02 belum memenuhi karena nilai SAIFI, SAIDI, dan CAIDI masih berada di atas batas standar IEEE.

REFERENSI

- [1] G. Li, D. Zhang, and Z. Bie, "An analytical method for reliability and resilience evaluation of power distribution systems with mobile power sources," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 267, p. 111817, 2026.
- [2] L. Ge, K. Hou, H. Jia, Z. Liu, and L. Zhu, "Continuous-time markov chain based sequential analytical reliability assessment approach for power distribution networks," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 172, p. 111069, 2025.
- [3] T. Sucita, M. Somantri, D. Fahrizal, and M. Agista, "Reliability analysis of 20 kv electricity distribution system on cwru feeder," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 13, no. 4, pp. 282–290, 2024.
- [4] B. Chitumodhu and G. Pilly, "Reliability evaluation of radial distribution system considering common mode failures and different weather effects," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024.
- [5] Z. Liu, Y. Zhao, and P. Liu, "An integrated fmea framework considering expert reliability for classification and its application in aircraft power supply system," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 123, p. 106319, 2023.
- [6] H. Schmidt, M. Käß, R. Lichtinger, and M. Hülsebrock, "Simulation-based fmea for the reliability assessment of printed circuit boards," *Microelectronics Reliability*, vol. 166, p. 115613, 2025.
- [7] SPLN, Keandalan pada Sistem Distribusi 20 kV dan 6 kV. Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara, 1985, sPLN No. 59.
- [8] IEEE, IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, iEEE Std 1366-2012.
- [9] G. Kirankumar and E. Vidyasagar, "Reliability evaluation of a distribution network: The impact of feeder configuration and optimal placement of shunt capacitors and fault passage indicators," *Next Research*, 2024.
- [10] G. Zeng, T. Yu, Z. Wang, and D. Lin, "Analytical reliability assessment of cyber-physical distribution system with distributed feeder automation," *Electric Power Systems Research*, 2024.
- [11] N. Najib and Hamma, "Analysis of feeder reliability in a 20 kv distribution network system using the reliability network equivalent approach," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2023.
- [12] M. Rizki, A. Dewi, and A. Syofian, "Reliability analysis of distribution system using section technique and ria-section technique method," *Journal of Electrical Power Systems*, 2024.
- [13] R. S. Widagdo, G. Budiono, and P. Slamet, "Analysis of the reliability index of the platuk feeder distribution system," *Journal of Electrical Engineering Research*, 2024.
- [14] A. M. Prasetya, L. Sartika, and A. H. Muslim, "Evaluation of 20 kv distribution system using saidi and saifi reliability indices," *Journal of Electrical Power Distribution*, 2024.
- [15] SPLN, Tingkat Jaminan Sistem Distribusi. Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara, 1986, sPLN No. 68-2.
- [16] L.-L. Huang, Z.-W. Wang, H.-R. Xu, B.-L. Wang, and W.-W. Chen, "Fmea-based risk mitigation for hospital ups failures," *Results in Engineering*, vol. 27, p. 106833, 2025.
- [17] P. A. G. M. Amarasinghe, S. K. Abeygunawardane, and C. Singh, "Reliability evaluation of solar integrated power distribution systems



- using an evolutionary swarm algorithm,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023.
- [18] B. Yildirim, M. Kamidehivand, N. Dimitrov, and A. Kolios, “Failure mode risk prioritization for floating wind turbines: An expert-based fmea framework from iea wind task 49,” *Energy Reports*, 2024.
- [19] R. Malini, T. Barlian, and A. Lestari, “Evaluation of reliability and energy not supplied in 20 kv distribution system,” *International Journal of Electrical Engineering*, 2025.
- [20] S. Ruggeri, G. Celli, F. Pilo, G. Malarange, and A. Pagnetti, “Simplified lv feeders model in presence of dg for mv network studies,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 13, pp. 19–28, 2018.