

Evaluasi Probabilistik Keandalan dan *Energy Not Supplied* Distribusi 20 kV ULP Karawang Kota Berbasis Monte Carlo

Dwi Andhika^{*1}, Abdul Azis², Andrias Fadillah³, Ulinnuha Latifa⁴

^{1,2,3,4}Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Indonesia
Email: ¹2210631160035@student.unsika.ac.id, ²2210631160023@student.unsika.ac.id,
³2210631160028@student.unsika.ac.id, ⁴ulinnuha.latifa@ft.unsika.ac.id

Abstrak

Gangguan pada sistem distribusi 20 kV di wilayah Karawang memicu *Energy Not Supplied* (ENS) dan menurunkan keandalan sistem. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja keandalan ULP Karawang Kota sekaligus merumuskan strategi mitigasinya. Novelty penelitian ini terletak pada penerapan Simulasi Monte Carlo (MCS) berbasis kombinasi distribusi Poisson (frekuensi) dan Lognormal (durasi) untuk menangkap sifat stokastik sistem secara akurat. Hasil simulasi menunjukkan nilai SAIFI 0,1427 kali/pelanggan/bulan, SAIDI 0,1994 jam/pelanggan/bulan, dan EENS 16.947,38 kWh/bulan. Meskipun masih memenuhi standar SPLN, analisis mendeteksi risiko *positive skewness* yang mengindikasikan potensi gangguan ekstrem. Kesimpulannya, PLN perlu bertransformasi ke strategi proaktif melalui mitigasi preventif dan pemetaan zona kritis untuk mencegah kerugian energi masif.

Kata kunci: *Distribusi 20 kV, Energy Not Supplied, Keandalan, Monte Carlo, SAIDI, SAIFI.*

Monte Carlo-Based Probabilistic Evaluation of Reliability and Energy Not Supplied Distribution of 20 kV ULP Karawang City

Abstract

Disruptions in the 20 kV distribution system Karawang trigger Energy Not Supplied (ENS) and degrade system reliability. This study aims to evaluate the reliability performance of ULP Karawang Kota and formulate mitigation strategies. The novelty of this research lies in applying a MATLAB-based Monte Carlo Simulation (MCS) that combines Poisson distribution (frequency) and Lognormal distribution (duration) to accurately capture the stochastic nature of the system. Simulation results show a SAIFI of 0.1427 times/customer/month, a SAIDI of 0.1994 hours/customer/month, and an EENS of 16,947.38 kWh/month. Although these metrics meet SPLN standards, statistical analysis detects a positive skewness risk, indicating the potential for future extreme disruptions. In conclusion, the utility needs to transition toward proactive strategies through preventive mitigation and critical zone mapping to prevent massive energy losses.

Keywords: *20 kV Distribution, Energy Not Supplied, Monte Carlo, Reliability, SAIDI, SAIFI.*

1. PENDAHULUAN

Jaringan distribusi listrik adalah bagian paling ujung dari sistem tenaga yang langsung menyentuh rumah tangga dan industri[1]. Karena posisinya berada di garis depan, gangguan pada bagian ini sangat dirasakan oleh masyarakat. Secara statistik, lebih dari 80% pemadaman listrik yang terjadi sebenarnya bersumber dari masalah di jaringan distribusi ini[2]. Oleh karena itu, menjaga keandalan jaringan distribusi untuk terus menyalurkan listrik tanpa henti menjadi faktor kunci bagi kemajuan ekonomi dan kenyamanan penduduk[3]. Masalah ini terlihat nyata di PT PLN (Persero) ULP Karawang Kota. Sepanjang tahun 2024, tercatat ada 289 kali gangguan listrik dengan total durasi mencapai 302,96 jam yang berdampak pada lebih dari satu juta pelanggan[4]. Mengingat Karawang adalah pusat industri besar, pemadaman sekecil apa pun bisa menyebabkan kerugian produksi yang sangat masif [5].

Meskipun evaluasi indeks keandalan seperti SAIFI dan SAIDI telah banyak diteliti sebelumnya [6],[7] sebagian besar studi terdahulu masih mengandalkan pendekatan deterministik (nilai rata-rata konstan) untuk menghitung laju gangguan dan durasi pemulihan [8]. Pendekatan konvensional tersebut kerap gagal menangkap sifat stokastik (acak) dan dinamika ketidakpastian di lapangan, sehingga hasil proyeksi cenderung bias dan kurang

akurat jika diterapkan pada wilayah industri yang dinamis, disinilah letak pentingnya penggunaan simulasi Monte Carlo (MCS). Jika perhitungan biasa hanya menggunakan angka rata-rata, simulasi Monte Carlo bekerja lebih cerdas dengan meniru ketidakpastian dunia nyata melalui ribuan percobaan acak di komputer menggunakan MATLAB[9], [10].

Kelebihan utama penelitian ini dibandingkan studi lainnya adalah:

- Menghitung Kerugian Energi (ENS): Studi ini tidak hanya melihat durasi pemadaman, tetapi juga menghitung berapa banyak energi (kWh) yang gagal tersalurkan ke pelanggan[11]. Ini adalah indikator kerugian paling nyata.
- Prediksi masa depan dengan mengolah data Januari 2025 untuk memetakan peluang risiko gangguan di bulan-bulan mendatang[8], [12], [13].

Dengan menggunakan pendekatan ini, kita bisa mengetahui apakah kondisi listrik di Karawang masuk dalam kategori andal atau tidak sesuai Standar PLN. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi masukan bagi PLN untuk melakukan perawatan jaringan distribusi secara lebih tepat sasaran, sehingga risiko mati lampu di masa depan bisa dikurangi seminimal mungkin.

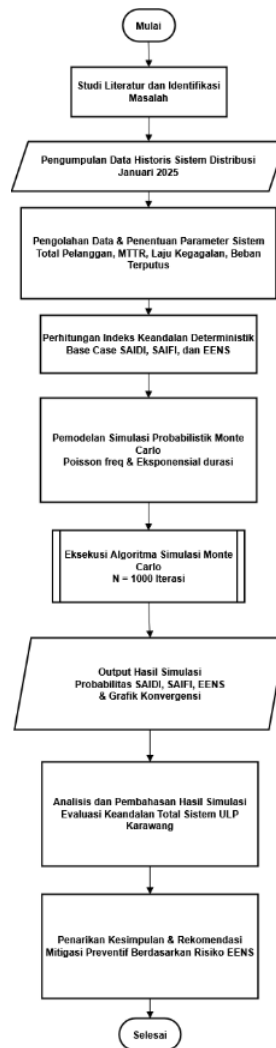
2. METODE PENELITIAN

Evaluasi kinerja keandalan pada sistem tenaga listrik dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan penilaian probabilitas (*probability assessment*)[9], [14]. Berbeda dengan metode analitis yang menggunakan pendekatan matematis statis untuk mengevaluasi indeks keandalan satu kali[9], teknik Simulasi Monte Carlo (MCS) dipilih karena kemampuannya dalam mengakomodasi sifat stokastik dan ketidakpastian yang melekat pada sistem tenaga listrik yang luas dan kompleks. Metode ini meniru riwayat kerusakan dan perbaikan komponen menggunakan distribusi probabilitas, sehingga keandalan sistem dapat dihitung berdasarkan data kegagalan dan durasi perbaikan yang tersedia[15], [16]. Dalam simulasi ini, penentuan jenis distribusi probabilitas didasarkan pada karakteristik fisik dari data historis gangguan di lapangan. Distribusi Poisson dipilih untuk memodelkan frekuensi gangguan karena karakteristiknya yang ideal dalam menggambarkan jumlah peristiwa acak yang terjadi dalam interval waktu tertentu dengan laju rata-rata (γ) yang konstan[17]. Sementara itu, distribusi Lognormal dipilih untuk memodelkan durasi pemulihan. Pemilihan Lognormal didasarkan pada sifat durasi perbaikan di dunia nyata yang tidak simetris di mana mayoritas gangguan dapat diselesaikan dengan cepat, namun terdapat sebagian kecil gangguan kompleks yang membutuhkan waktu perbaikan sangat lama akibat kendala teknis atau geografis[18].

MCS memungkinkan pemeriksaan status kegagalan sistem terlepas dari tingkat kerumitan sistem tersebut. Algoritma simulasi diimplementasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB yang dipilih sebagai alat komputasi numerik karena kemampuannya yang *powerful* dalam analisis sistem tenaga listrik serta visualisasi data[16]. Fleksibilitas lingkungan pemrograman MATLAB memungkinkan pengembangan algoritma Monte Carlo yang kompleks guna menghitung indeks keandalan seperti SAIFI, SAIDI, dan ENS secara efisien dan akurat berdasarkan pemodelan data historis.

2.1 Tahapan Penelitian

Untuk memastikan proses penelitian berjalan secara sistematis dan terstruktur, penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, dimulai dari pengumpulan data historis gangguan, proses analisis dan pemodelan menggunakan metode Simulasi Monte Carlo, hingga evaluasi indeks keandalan sistem distribusi listrik. Rangkaian tahapan penelitian tersebut disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.2 Objek Penelitian Dan Pengumpulan Data

2.3 Parameter Keandalan Deterministik (Base Case) Dan Model Distribusi Probabilitas

Untuk mendukung simulasi Monte Carlo dalam mengevaluasi keandalan ULP Karawang Kota, data gangguan tahun 2025 dikonversi menjadi parameter statistik. Proses ini mencakup penghitungan indeks keandalan serta pemodelan distribusi durasi gangguan sebagai basis input stokastik dalam perhitungan ENS (*Energy Not Supplied*).

2.3.1 Indeks Keandalan Jaringan Distribusi

Keandalan pada sistem tenaga listrik sangat bergantung pada kontinuitas penyaluran energi serta intensitas pemadaman, yang menjadi aspek krusial bagi operator sistem maupun pengguna akhir [1]. Penilaian performa jaringan distribusi umumnya diukur menggunakan parameter SAIDI dan SAIFI sebagai indikator mutu layanan, yang dihitung berdasarkan variabel durasi gangguan, frekuensi kejadian, serta total pelanggan terdampak [6], [7], [19]. Melalui analisis indeks ini, efektivitas sistem dapat dievaluasi secara menyeluruh dengan memvalidasi hasil perhitungan terhadap standar regulasi maupun kriteria industri yang berlaku [20]. Salah satu parameter kunci, yaitu *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI), merepresentasikan rata-rata durasi kegagalan pasokan yang dirasakan pelanggan dalam kurun waktu tertentu [21]. Adapun formulasi matematis untuk SAIDI didefinisikan sebagai berikut:

$$SAIDI = \frac{\sum(U_i \times N_i)}{\sum N} \tag{1}$$

Keterangan :

- U_i : durasi pemadaman (jam)
- N_i : jumlah pelanggan yang mengalami pemadaman
- N : jumlah total pelanggan yang dilayani

Parameter lain yang digunakan dalam evaluasi ini adalah SAIFI, sebuah indeks yang merepresentasikan seberapa sering rata-rata pelanggan mengalami gangguan pasokan listrik selama periode observasi [6], [7], [19]. Formulasi untuk menentukan nilai indeks SAIFI ditunjukkan pada Persamaan (2):

$$SAIFI = \frac{\sum(\lambda_i \times N_i)}{\sum N} \quad (2)$$

Keterangan :

- λ_i : Frekuensi pemadaman
- N_i : jumlah pelanggan yang mengalami pemadaman
- N : jumlah total pelanggan yang dilayani

2.3.2 Mean Time To Repair (Mtrr)

Mean Time To Repair (MTTR) didefinisikan sebagai estimasi waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk mengembalikan sistem ke kondisi operasional setelah terjadinya kegagalan [22], [23]. Dalam simulasi keandalan, parameter ini berfungsi sebagai acuan dasar dalam menentukan durasi pemadaman dan diformulasikan melalui Persamaan (3) berikut ini :

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n L_1}{n} \quad (3)$$

2.3.3 Pemodelan Distribusi Probabilitas

Pemodelan variabel input menggunakan *Probability Density Function* (PDF) dilakukan untuk menggambarkan karakteristik stokastik gangguan distribusi. Distribusi Poisson diterapkan pada titik beban sistem radial guna memproyeksikan total kegagalan satu bulan secara acak [24], di mana probabilitas jumlah kejadian kegagalan dalam interval waktu tertentu dihitung dengan Persamaan (4) berikut ini :

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (4)$$

Parameter $P(n)$ merepresentasikan probabilitas kemunculan n kali kegagalan, dengan λ sebagai laju gangguan rata-rata tahunan yang diestimasi berdasarkan data operasional bulanan 2025. Selain pemodelan frekuensi, durasi pemulihan gangguan dipetakan menggunakan Distribusi Lognormal. Pemilihan distribusi ini didasarkan pada karakteristik durasi yang bersifat kontinu dan memiliki *positive skewness*, sehingga nilai tendensi sentral geometrik dianggap lebih akurat daripada rata-rata aritmatika. Secara matematis, jika variabel acak (Y) berdistribusi Normal, maka variabel $X = e^Y$ akan mengikuti distribusi Lognormal dengan parameter lokasi μ dan skala σ^2 [25]. Adapun fungsi densitas probabilitas (PDF) untuk durasi pemulihan tersebut dinyatakan dalam Persamaan (5)."

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

Fungsi $f(t)$ mendefinisikan probabilitas durasi dengan μ sebagai parameter lokasi dan σ sebagai parameter skala logaritmik, di mana t adalah durasi pemadaman ($t > 0$) [18]. Sesuai dengan Persamaan (4) dan (5), kedua distribusi ini menjadi instrumen kunci untuk menghasilkan variabel acak dalam tahapan simulasi Monte Carlo.

2.3.4 Ens (Energy Not Supplied)

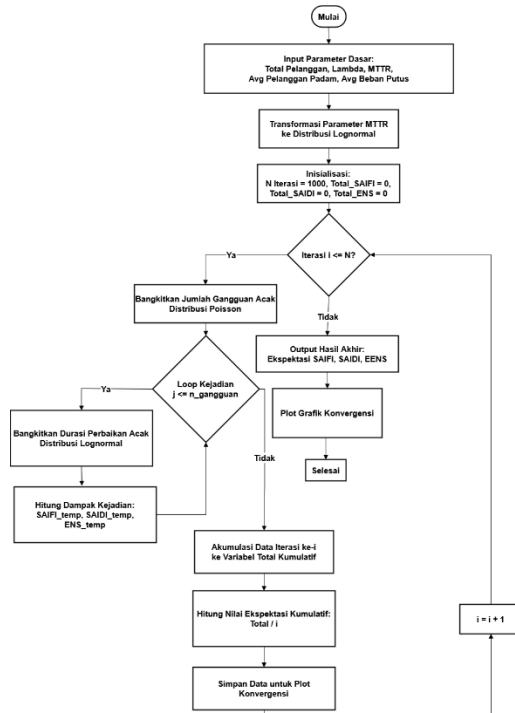
ENS (*Energy Not Supplied*) merupakan energi yang tidak tersalurkan, yang merujuk pada jumlah energi yang seharusnya dialokasikan kepada pelanggan namun hilang akibat pemadaman atau kegagalan jaringan [11], [26][1]. Indeks ini merepresentasikan total energi yang gagal didistribusikan oleh sistem distribusi dirumuskan sebagai berikut :

$$ENS = \sum(L_{avg} \times r_i) \tag{6}$$

Keterangan :

- L_{avg} : Daya aktif
- r_i : Durasi waktu pemadaman

2.5 Algoritma Simulasi Monte Carlo



Gambar 2. Algoritma simulasi Monte Carlo

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Profil Gangguan Sistem Pln Karawang

Tabel 1. Profil gangguan sistem pln karawang (januari 2025)

NO	Penyulang	Jumlah Pelanggan	Jumlah Gangguan	Jumlah pelanggan padam	Lama Padam (Jam)
1	Karang Linggar	13074	4	4886	2.10
2	Mataram	-	1	572	0.68
3	Papandayan	22783	1	767	2.78
4	kediri	14261	2	1331	0.82
5	Hercules	13929	1	313	1.48
6	Lumba	10294	1	3137	1.6
7	Tambora	16346	2	16,898	3.95
8	Indo pastika	148	1	53	0.93
9	Ramayana	4172	1	2747	3.92
10	Karaba	14874	4	12515	6.39
11	Karawang Kota	21441	2	2203	3.15
12	Rinjani	19971	1	2,018	0.23
13	Kelud	-	1	1,125	2.83
14	Tangkuban Perahu	1568	1	145	1.30
	<i>Total</i>		23	48710	32.16

NO	Penyulang	Jumlah Pelanggan	Jumlah Gangguan	Jumlah pelanggan padam	Lama Padam (Jam)
<i>Total KWH TAK TERSALUR</i>				16.953	
<i>TOTAL PELANGGAN ULP KARAWANG KOTA PADA BULAN JANUARI</i>				341.414	

3.2. Perhitungan Indeks Keandalan Dasar

Tabel 2. Hasil perhitungan indeks SAIFI

NO	Penyulang	Jumlah Pelanggan ULP Karawang Kota	Jumlah Gangguan	Jumlah Pelanggan Padam	SAIFI (Kali/Pelanggan N/Bulan)
1	Karang Linggar		4	4886	0.0143
2	Mataram		1	572	0.0017
3	Papandayan		1	767	0.0022
4	kediri		2	1331	0.0039
5	Hercules		1	313	0.0009
6	Lumba		1	3137	0.0092
7	Tambora		2	16,898	0.0495
8	Indo pastika	341414	1	53	0.0002
9	Ramayana		1	2747	0.0080
10	Karaba		4	12515	0.0367
11	Karawang Kota		2	2203	0.0065
12	Rinjani		1	2,018	0.0059
13	Kelud		1	1,125	0.0033
14	Tangkuban Perahu		1	145	0.0004
<i>Total SAIFI ULP Karawang Kota</i>		341414	23	48710	0.1427

Tabel 3. Hasil perhitungan indeks SAIDI

NO	Penyulang	Jumlah Pelanggan ULP Karawang Kota (Januari)	Durasi Padam (Jam)	Jumlah Pelanggan Padam	SAIDI (Jam/Pelanggan /Bulan)
1	Karang Linggar	341414	2.10	4886	0.0301
2	Mataram		0.68	572	0.0011
3	Papandayan		2.78	767	0.0062
4	kediri		0.82	1331	0.0032
5	Hercules		1.48	313	0.0014
6	Lumba		1.6	3137	0.0147
7	Tambora		3.95	16,898	0.1955
8	Indo pastika		0.93	53	0.0001
9	Ramayana		3.92	2747	0.0315
10	Karaba		6.39	12515	0.2342
11	Karawang Kota		3.15	2203	0.0203
12	Rinjani		0.23	2,018	0.0014
13	Kelud		2.83	1,125	0.0093
14	Tangkuban Perahu		1.30	145	0.0006
<i>Total Total SAIDI ULP Karawang Kota</i>		341414	32.16	48710	0.5497

Berdasarkan data Januari 2025, diperoleh rata-rata beban putus sebesar 527,14 kW dengan durasi pemadaman akumulatif sebesar 32,16 jam. Maka secara deterministik, nilai ENS dapat dihitung sebagai berikut:

$$ENS = 527,14 \times 32,16 = 16,953 \text{ kWh}$$

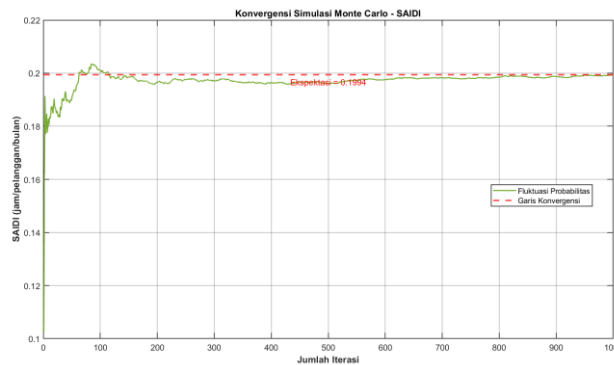
3.3. Penentuan Parameter Input Simulasi

Berdasarkan hasil perhitungan keandalan secara deterministik pada tahapan sebelumnya, langkah selanjutnya adalah mengekstraksi data historis gangguan menjadi parameter input untuk simulasi probabilistik. Nilai-nilai ini diintegrasikan dari data operasional 14 penyulang untuk merepresentasikan karakteristik rata-rata sistem distribusi ULP Karawang Kota selama observasi bulan Januari 2025. Ringkasan parameter input yang akan digunakan sebagai basis pembangkitan bilangan acak dalam algoritma Monte Carlo disajikan pada Tabel 3.

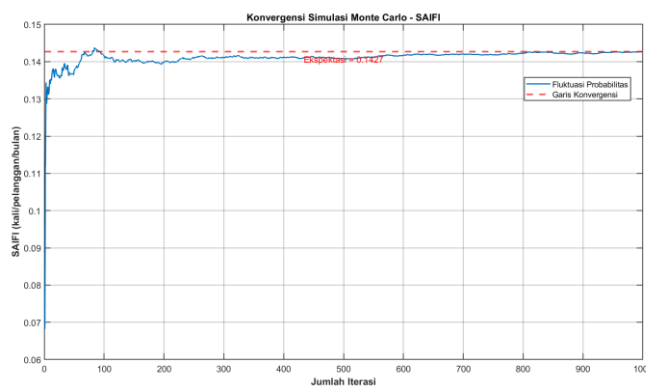
Tabel 4. Parameter Input Simulasi Probabilistik Monte Carlo

Parameter Input	Nilai	Satuan	Distribusi Probabilitas
Total Pelanggan Sistem	341.414	Pelanggan	Konstan (Tetap)
Laju Kegagalan (λ)	23	Gangguan / Bulan	Distribusi Poisson
Mean Time To Repair (MTTR)	1,398	Jam / Gangguan	Distribusi Lognormal / Eksponensial
Rata-rata Pelanggan Padam	2.117,83	Pelanggan / Kejadian	Nilai Pengali Acak
Rata-rata Beban Putus	527,14	kW / Kejadian	Nilai Pengali Acak

3.4. Analisis Indeks Keandalan Sistem Dan Evaluasi Ens Berbasis Monte Carlo



Gambar 3. Grafik Konvergensi Simulasi Monte Carlo indeks SAIDI



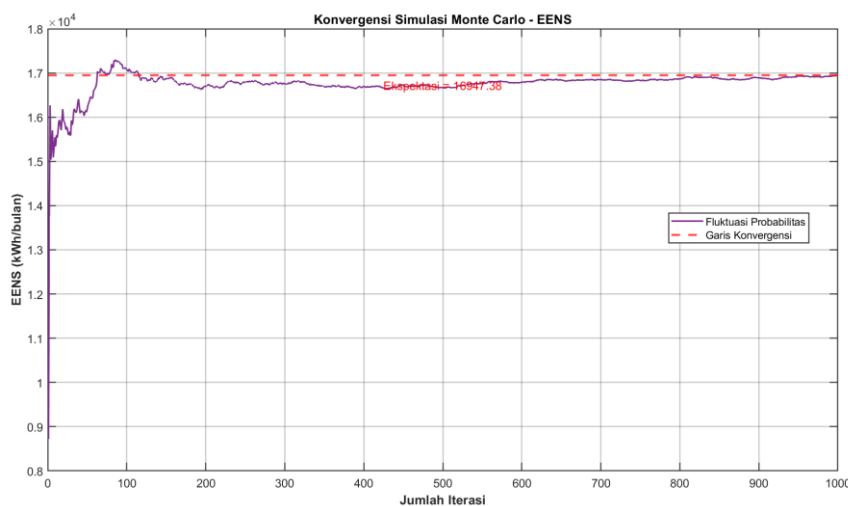
Gambar 4. Grafik Konvergensi Simulasi Monte Carlo indeks SAIFI

Proses evaluasi keandalan pada jaringan distribusi 20 kV ULP Karawang Kota dilakukan melalui simulasi Monte Carlo dengan total 1000 iterasi untuk memastikan stabilitas statistik hasil. Berdasarkan grafik konvergensi, terlihat adanya fluktuasi signifikan pada awal iterasi yang merepresentasikan sifat stokastik dari variabel input frekuensi distribusi Poisson dan durasi gangguan distribusi Lognormal. Namun, seiring bertambahnya jumlah sampel, nilai rata-rata kumulatif mulai stabil dan mencapai kondisi konvergen (*steady state*) setelah melampaui 800 iterasi. Fenomena ini menunjukkan bahwa model telah berhasil menangkap variabilitas acak sistem dunia

nyata dan menghasilkan estimasi yang presisi terhadap performa jaringan. Hasil akhir simulasi menetapkan nilai ekspektasi SAIFI sebesar 0,1427 kali/pelanggan/bulan dan SAIDI sebesar 0,1994 jam/pelanggan/bulan. Secara teknis, nilai SAIFI tersebut mengindikasikan bahwa setiap pelanggan di wilayah ULP Karawang Kota diprediksi mengalami pemadaman rata-rata sebanyak 0,1427 kali per bulan, sementara indeks SAIDI menunjukkan rata-rata durasi pemadaman mencapai kurang lebih 12 menit per bulan. Meskipun nilai SAIDI rata-rata berada pada kisaran 12 menit per bulan, distribusi Lognormal menunjukkan adanya uncertainty yang lebar dengan potensi durasi pemulihan melampaui 1,398 jam pada skenario gangguan kompleks. Hal ini merepresentasikan analisis sensitivitas di mana variabel durasi pemulihan (repair time) memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap total ENS dibandingkan variabel frekuensi gangguan. Dengan kata lain, efektivitas penanganan gangguan di lapangan oleh tim teknis PLN lebih menentukan besarnya kerugian energi daripada jumlah kejadian gangguan itu sendiri.

Tabel 5. Hasil simulasi indeks SAIFI dan SAIDI

Indeks Keandalan	Hasil Simulasi Monte Carlo	Standar Maksimum SPLN (Bulan)	Keterangan
SAIFI	0,143 kali/pelanggan	0,26 kali	Memenuhi Standar (Andal)
SAIDI	0,551 jam/pelanggan	1,75 jam	Memenuhi Standar (Andal)



Gambar 5. Grafik Konvergensi Simulasi Monte Carlo EENS

Berdasarkan hasil simulasi Monte Carlo yang dilakukan sebanyak 1000 iterasi, nilai ekspektasi EENS menunjukkan tren konvergensi yang stabil pada angka 16.947,38 kWh/bulan. Pencapaian nilai ekspektasi ini dikalkulasi berdasarkan integrasi antara variabel beban aktif rata-rata sebesar 527,14 kW dengan durasi pemadaman acak yang dibangkitkan melalui distribusi Lognormal. Grafik konvergensi EENS memperlihatkan fluktuasi probabilitas yang dinamis pada awal tahapan iterasi, yang mencerminkan variabilitas stokastik dari beban terputus dan durasi gangguan di lapangan. Namun, seiring bertambahnya sampel acak, nilai rata-rata kumulatif bergerak melandai dan berhimpit dengan garis ekspektasi, menandakan bahwa hasil simulasi telah mencapai saturasi statistik yang valid.

Tabel 6. Perbandingan perhitungan manual dengan simulasi

Parameter Perbandingan	Perhitungan Manual	Hasil Ekspektasi Monte Carlo	Selisih
Total ENS (kWh/bulan)	16.963,36 kWh	16.947,38 kWh	0,09%

Penggunaan distribusi Lognormal mengungkapkan bahwa sistem memiliki risiko *positive skewness*. Meskipun rata-rata durasi gangguan terkendali pada 1,398 jam, terdapat probabilitas kecil terjadinya gangguan ekstrem yang dapat menyebabkan lonjakan ENS secara drastis. Integrasi data Januari 2025 ke dalam model MCS membuktikan bahwa pendekatan probabilistik adalah instrumen vital bagi operator untuk mengidentifikasi zona kritis. Nilai ENS yang mencapai kisaran 16.947,38 kWh merupakan angka yang signifikan. Analisis ini menegaskan bahwa meskipun sistem terlihat andal secara statistik, potensi kerugian energi yang tidak tersalurkan

tetap nyata dan memerlukan penanganan serius untuk menghindari kerugian finansial yang lebih besar bagi pelanggan di Karawang. Secara keseluruhan, sistem distribusi 20 kV ULP Karawang Kota menunjukkan stabilitas operasional, namun tetap memerlukan pengawasan ketat terhadap variabel durasi pemulihan guna meminimalisir risiko kerugian energi di masa mendatang.

3.5. Usulan Mitigasi Preventif Untuk Peningkatan Keandalan Sistem Pln

Untuk meningkatkan keandalan jaringan distribusi 20 kV di wilayah ULP Karawang Kota, diperlukan strategi dari pola kerja proaktif melalui integrasi data hasil simulasi stokastik ke dalam kebijakan operasional lapangan, upaya proses mitigasi harus difokuskan pada pengurangan durasi pemadaman dan pencegahan kegagalan komponen guna meminimalisir nilai *Energy Not Supplied* (ENS) serta menjaga kepatuhan terhadap standar keandalan SPLN. Berikut merupakan usulan mitigasi preventif untuk peningkatan keandalan sistem PLN:

1. Mempercepat waktu penanganan gangguan dengan menempatkan unit reaksi cepat di area dengan probabilitas kegagalan tinggi
2. Menggunakan hasil Simulasi Monte Carlo untuk mengidentifikasi "zona kritis" pada penyulang dan melakukan inspeksi teknis rutin guna mendeteksi anomali sebelum terjadi kegagalan sistem.
3. Mendorong skema suplai cadangan bagi pelanggan industri strategis dan memantau beban secara *real-time* untuk memberikan prioritas pemulihan pada wilayah dengan dampak kerugian energi (kWh) terbesar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan evaluasi keandalan jaringan distribusi 20 kV ULP Karawang Kota menggunakan Simulasi Monte Carlo 1000 iterasi, temuan utama penelitian menunjukkan bahwa model mencapai kondisi konvergen (*steady state*) setelah melampaui 800 iterasi. Hasil simulasi menetapkan nilai ekspektasi SAIFI sebesar 0,1427 kali/pelanggan/bulan dan SAIDI sebesar 0,1994 jam/pelanggan/bulan, di mana kedua indeks ini secara statistik masih memenuhi standar SPLN 68-2:1986. Sementara itu, nilai ekspektasi *Energy Not Supplied* (ENS) stabil pada angka 16.947,38 kWh/bulan. Meskipun sistem saat ini dinilai andal, analisis distribusi Lognormal mendeteksi adanya risiko *positive skewness* yang mengindikasikan adanya ancaman gangguan ekstrem (*low-frequency high-impact*) di masa mendatang yang berpotensi memicu lonjakan kerugian energi secara drastis.

Sebagai langkah mitigasi, rekomendasi praktis yang diusulkan bagi PT PLN (Persero) adalah mentransformasikan strategi pengelolaan jaringan dari reaktif menjadi proaktif. Hal ini dapat dicapai melalui percepatan durasi pemulihan oleh Unit Reaksi Cepat untuk memangkas ekor gangguan panjang, pemetaan "zona kritis" pada penyulang yang rawan berdasarkan hasil simulasi probabilitas ini, serta penerapan skema suplai cadangan otomatis bagi konsumen industri strategis di Karawang guna meminimalkan risiko kerugian finansial yang masif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. A. Kiriweno, E. T. Mbitu, and A. J. Kastanja, "Jaringan Distribusi Berdasarkan SAIDI-SAIFI Pada Penyulang Ahuru Area Ambon," *Elektrikal dan Komputer*, vol. 5, no. 2, pp. 248–263, 2023.
- [2] J. R. Cristobal and R. V. M. Santiago, "Reliability Assessment of Power Distribution System in Freeport Area of Bataan †," *Engineering proceedings*, vol. 92, no. 1, pp. 1–9, 2025, doi: 10.3390/engproc2025092058.
- [3] T. A. Aderemi and M. M. Sikwela, "Electricity Consumption and Industrial Outputs in Economic Community of West African States Countries : Evidence from a Panel Dynamic Ordinary Least Squares and Granger Causality," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 15, no. 3, pp. 1–7, 2025, doi: 10.32479/ijeep.17490.
- [4] S. Mendrofa and M. E. D. Rahmaniar, "The Analysis of Performance Reliability Electric Power System in 20 kV Distribution Network in PT. PLN," *Journal of Computer Science, Information Technology and Telecommunication Engineering (JCoSITTE)*, vol. 6, no. 1, pp. 835–845, 2025, doi: 10.30596/jcositte.v6i1.23677.
- [5] B. Harsanto *et al.*, "Usulan model pemeliharaan distribusi tenaga listrik menggunakan metode TRDX untuk meningkatkan keandalan pada pelanggan industri (Proposed electric power distribution maintenance model using the TRDX method to increase reliability for industrial customer," *Journal of Applied Industrial Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 342–350, 2021.
- [6] N. Pasra, M. Fajri, J. Barat, and J. Barat, "Evaluasi Tingkat Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Indeks SAIDI SAIFI," *SUTET*, vol. 12, no. 1, pp. 31–41, 2022, doi: 10.33322/sutet.v12i1.1644.

- [7] I. Pratama, Yasin Mohamad, and Taufiq Ismail Yusuf, "Analisis Keandalan Jaringan Distribusi 20kV Pada ULP Toili Berdasarkan SAIDI dan SAIFI," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 197–203, 2023.
- [8] N. N. R. Roslan, N. F. M. Fauzi, and M. I. M. Ridzuan, "Monte Carlo simulation convergences ' percentage and position in future reliability evaluation," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, no. 6, pp. 6218–6227, 2022, doi: 10.11591/ijece.v12i6.pp6218-6227.
- [9] N. F. M. Fauzi, N. N. R. Roslan, and M. I. M. Ridzuan, "Low voltage reliability equivalent using monte-carlo simulation technique," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 863, no. 1, p. 12042, May 2020, doi: 10.1088/1757-899X/863/1/012042.
- [10] M. F. N. Farhanie, R. N. N. Rusyda, and M. I. M. Ridzuan, "Reliability Assessment On Network Equivalent Using Monte-Carlo Simulation Technique," *PLATFORM - A Journal of Engineering The*, vol. 4, no. 2, pp. 76–90, 2020.
- [11] K. Sawitri and P. Gemahapsari, "Studi Keandalan Ketersediaan Daya Pembangkit Listrik pada Jaringan Daerah ' X ," *ELKOMIKA*, vol. 5, no. 1, pp. 93–105, 2017, doi: 10.26760/elkomika.v5i1.93.
- [12] M. Ikhwan *et al.*, "Fault Rates Alpha-Tolerance of Monte Carlo Simulation (FRAT-MCS) for Reliability Performance of Power System Network," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 30, p. 101132, 2026, doi: 10.1016/j.clet.2025.101132.
- [13] G. Pretticco, A. Marinopoulos, and S. Vitiello, "Guiding electricity distribution system investments to improve service quality: A European study," *Util. Policy*, vol. 77, p. 101381, 2022, doi: 10.1016/j.jup.2022.101381.
- [14] N. Farhanie, M. Fauzi, N. Nabihah, R. Roslan, M. Ikhwan, and M. Ridzuan, "Reliability performance of distribution network by various probability distribution functions," *Jurnal Internasional Teknik Elektro dan Komputer (IJECE)*, vol. 13, no. 2, pp. 2316–2325, 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i2.pp2316-2325.
- [15] T. P. Abud, A. A. Augusto, M. Z. Fortes, R. S. Maciel, and B. S. M. C. Borba, "State of the Art Monte Carlo Method Applied to Power System Analysis with Distributed Generation," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 1, 2023, doi: 10.3390/en16010394.
- [16] Y. Dechgummarn, P. Fuangfoo, and Warayut Kampeerawat, "Reliability Assessment and Improvement of Electrical Distribution Systems by Using Multinomial Monte Carlo Simulations and a Component Risk Priority Index," *IEEE Power & Energy Society (PES)*, vol. 10, pp. 111923–111935, 2022.
- [17] J. Cheng, J. Ming, and X. Chen, "Low voltage reliability equivalent using monte- carlo simulation technique", doi: 10.1088/1757-899X/863/1/012042.
- [18] J. Moral and D. Rubia, "Lognormal distribution for social researchers : A probability classic," *International Journal of Psychology and Counselling*, vol. 16, no. 2, pp. 10–25, 2024, doi: 10.5897/IJPC2024.0702.
- [19] N. Lembang, Y. Nantan, N. Husnah, and Y. La Elo, "Analysis Of SAIDI And SAIFI Stability In The Distribution System At PT . PLN (Persero) ULP Fakfak," *Media Elektrik Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 191–202, 2024.
- [20] E. H. Sadiq and R. K. Antar, "Reliability improvement of distribution networks : A case study of Duhok distribution network," *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 73–92, 2025, doi: 10.24003/emitter.v13i1.908.
- [21] M. R. Harjjan, S. Supriyatna, A. B. Muljono, and R. R. E. Putra, "Analisis SAIFI Dan SAIDI Sebagai Indeks Keandalan Pada Gardu Induk Kuta Menggunakan Metode Section Technique And Failure Mode Effect & Analysis (FMEA)," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, 2025, doi: 10.23960/JITET.V13I2.6450.
- [22] I. Yoga Pratama *et al.*, "Prediksi Keandalan Sistem Jaringan Distribusi 20KV Gardu Induk Kebumen Pada Penyulang KBM02," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 7, no. 2, pp. 215–224, 2025, doi: 10.32528/elkom.v7i2.22636278.
- [23] F. Funan and W. Utama, "Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Berdasarkan Indeks Keandalan SAIDI dan SAIFI pada PT PLN (PERSERO) Rayon," *Jurnal Ilmiah TELSINAS*, vol. 3, no. 1, pp. 32–36, 2020.
- [24] R. N. I. Dinnullah, S. Abusini, R. Fitriani, and M. Marjono, "Analyzing Motorcycle Accident Frequency Using Generalized Poisson Distributions," *TEM Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 234–246, 2024, doi: 10.18421/TEM131-24.
- [25] Sunaryo, Japri, Yuhelson, and L. Hakim, "Implementasi RCM pada mesin diesel Deutz 20 kVA," *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, vol. 10, no. 1, pp. 42–52, 2021, [Online]. Available: <http://ojs.ummmetro.ac.id/index.php/turbo%0AImplementasi>

- [26] R. S. Malini, T. Barlian, and A. I. Lestari, "Evaluation of Reliability and Energy Not Supplied in the 20 kV Distribution System at the Tanjung Api-Api Substation," *Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM)*, vol. 7, no. 1, 2025, doi: 10.33650/jeeecom.v4i2.