Jurnal Impresi Indonesia (JII)
p-ISSN: 2828-1284 e-ISSN: 2810-062x
Vol. 5. No. 8. Agustus 2026

Studi Susut Teknis Jaringan Distribusi Menggunakan Metode Pendekatan Monte Carlo (Studi Kasus PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Sape)

Mei Priyanto*, Musa Partahi Marbun
Institut Teknologi Pln Jakarta, Indonesia
Email: Mei.mehong.mepro@gmail.com*

Keywords:
technical losse; Jogja Formula; Monte Carlo simulation; probabilistic analysis; distribution network.

Abstract
Managing technical losses in distribution networks is a key aspect of improving the efficiency of electricity delivery. Long feeders, varying transformer loading, and changing voltage profiles make technical losses difficult to estimate using a deterministic approach alone. This study analyzes technical losses on the distribution network of PT PLN (Persero) Sape Customer Service Unit (ULP) by integrating the Jogja Formula as a deterministic method with Monte Carlo simulation as a probabilistic approach to evaluate how variations in operating conditions affect technical losses. The study uses distribution system technical data for January–April 2026, covering the medium-voltage network, distribution transformers, low-voltage network, delivered energy, customer load composition, and voltage conditions. Technical losses were calculated using the Jogja Formula, while a 10,000-iteration Monte Carlo simulation represented variation in operating conditions. A sensitivity analysis using the Standardized Regression Coefficient (SRC) was then performed to identify the most influential variables. The results show a simulated average total technical loss of about 5.53%, ranging from 5.20% to 6.01% (P5–P95: 5.39%–5.68%), with delivered energy, medium-voltage conditions, and low-voltage conditions as the most dominant variables (R^2 = 0.8409), while transformer loading and medium-voltage customer composition show a relatively smaller influence. The integration of the Jogja Formula and Monte Carlo simulation provides a more comprehensive analytical approach than a deterministic method alone and can serve as a basis for formulating technical-loss management strategies in distribution systems.

Kata Kunci:
susut teknis; Formula Jogja; simulasi Monte Carlo; analisis probabilistic; jaringan distribusi.

Abstrak
Pengelolaan susut teknis pada jaringan distribusi merupakan salah satu aspek penting dalam meningkatkan efisiensi penyaluran energi listrik. Kondisi jaringan distribusi dengan penyulang yang panjang, pembebanan transformator yang bervariasi, serta perubahan profil tegangan menyebabkan besarnya susut teknis sulit diperkirakan hanya menggunakan pendekatan deterministik. Penelitian ini bertujuan menganalisis susut teknis pada jaringan distribusi PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Sape melalui integrasi Formula Jogja sebagai metode deterministik dan simulasi Monte Carlo sebagai pendekatan probabilistik untuk mengevaluasi pengaruh variasi kondisi operasi terhadap perubahan susut teknis.

Penelitian menggunakan data teknis sistem distribusi periode Januari–April 2026 yang meliputi jaringan tegangan menengah, transformator distribusi, jaringan tegangan rendah, energi tersalur, komposisi pembebanan pelanggan, dan kondisi tegangan. Perhitungan susut teknis dilakukan menggunakan Formula Jogja, sedangkan simulasi Monte Carlo sebanyak 10.000 iterasi digunakan untuk merepresentasikan variasi kondisi operasi sistem distribusi, dilanjutkan dengan analisis sensitivitas menggunakan Standardized Regression Coefficient (SRC). Hasil penelitian menunjukkan rata-rata total susut teknis hasil simulasi sebesar 5,53%, dengan rentang 5,20%–6,01% (P5–P95: 5,39%–5,68%), serta energi tersalur, tegangan tegangan menengah, dan tegangan tegangan rendah sebagai variabel paling dominan (R^2 = 0,8409), sedangkan pembebanan transformator dan komposisi pelanggan tegangan menengah memberikan pengaruh yang relatif lebih kecil. Integrasi Formula Jogja dan simulasi Monte Carlo memberikan pendekatan analisis yang lebih komprehensif dibandingkan metode deterministik saja, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan strategi pengelolaan susut teknis pada sistem distribusi.

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama yang mendukung aktivitas masyarakat, pertumbuhan ekonomi, perkembangan industri, serta penyediaan layanan publik. Peningkatan kebutuhan energi listrik menuntut penyelenggara sistem tenaga listrik untuk menjamin kontinuitas pasokan sekaligus meningkatkan efisiensi penyaluran energi dari gardu induk hingga ke pelanggan (Agung et al., n.d.; Kim & Hur, 2020; Menggunakan & Monte, 2025; Penerapan & Monte, 2025; PLN, n.d.). Salah satu indikator efisiensi tersebut adalah besarnya susut teknis (technical losses) pada jaringan distribusi, yaitu rugi-rugi energi yang timbul akibat karakteristik penghantar, transformator, serta kondisi operasi sistem distribusi. Meskipun tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, besarnya susut teknis dapat ditekan melalui pengelolaan jaringan yang tepat (PLN, 1991, 2017; Rahmani, 2024; Salkuti & Battu, 2021; Tobing, 2022).

Besarnya susut teknis dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain panjang jaringan distribusi, konfigurasi penyulang, tingkat pembebanan transformator, komposisi pembebanan pelanggan, serta kualitas tegangan selama proses penyaluran energi listrik. Perubahan pada salah satu parameter tersebut memengaruhi besarnya arus yang mengalir pada penghantar sehingga berdampak langsung terhadap rugi-rugi daya, sehingga evaluasi susut teknis menjadi dasar dalam penyusunan strategi peningkatan efisiensi sistem distribusi (Imran et al., 2022; Khalid et al., 2023; Otuo-Acheampong & Hussain, 2023; Wei et al., 2023; Wiranto et al., n.d.).

PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Sape, yang berada di bawah UP3 Bima, UIW Nusa Tenggara Barat, merupakan salah satu wilayah dengan karakteristik jaringan distribusi yang memerlukan perhatian khusus karena berada pada ujung sistem distribusi dan hanya memperoleh pasokan dari satu gardu induk. Berdasarkan data operasional periode Januari–April 2026, ULP Sape melayani 57.728 pelanggan melalui 4 penyulang dengan total panjang jaringan mencapai 333,24 kms dan didukung oleh 229 unit transformator distribusi berkapasitas terpasang sekitar 21.870 kVA. Selama periode tersebut, nilai susut teknis tercatat sebesar 5,78%, dengan penjualan energi didominasi oleh pelanggan tegangan rendah sebesar

4.534.857 kWh dan pelanggan tegangan menengah sebesar 1.729.816 kWh. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik jaringan, komposisi penyaluran energi, dan perubahan kondisi operasi berpotensi memengaruhi besarnya susut teknis sehingga diperlukan analisis yang lebih mendalam (Alqahtani et al., 2023; Li et al., 2023; Syukri et al., 2022; Yasa et al., 2024; Yuvaraj et al., 2023).

Metode yang banyak digunakan di lingkungan PLN untuk menghitung susut teknis adalah Formula Jogja, karena mampu menghitung besarnya susut pada jaringan tegangan menengah, transformator distribusi, jaringan tegangan rendah, dan sambungan rumah menggunakan parameter teknis sistem distribusi. Meskipun demikian, pendekatan deterministik ini menghasilkan nilai susut berdasarkan kondisi tertentu sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan perubahan kondisi operasi yang bersifat dinamis, seperti fluktuasi pembebanan, perubahan komposisi penyaluran energi pelanggan, maupun variasi tegangan jaringan. Simulasi Monte Carlo telah banyak digunakan pada analisis probabilistik sistem tenaga karena mampu menggambarkan pengaruh ketidakpastian terhadap kinerja sistem, namun penelitian yang mengintegrasikan Formula Jogja dengan simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi susut teknis jaringan distribusi, khususnya pada sistem dengan karakteristik seperti ULP Sape, masih relatif terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi Formula Jogja sebagai metode deterministik dengan simulasi Monte Carlo sebagai pendekatan probabilistik dalam menganalisis susut teknis jaringan distribusi. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan salah satu pendekatan, penelitian ini mengkombinasikan keduanya untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif. Selain itu, penelitian ini menggunakan analisis sensitivitas Standardized Regression Coefficient (SRC) untuk mengidentifikasi variabel yang paling dominan memengaruhi perubahan persentase susut teknis ketika seluruh variabel berubah secara simultan sesuai distribusi probabilitasnya, yang belum banyak dilakukan pada penelitian sejenis di Indonesia.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengintegrasikan Formula Jogja sebagai metode deterministik dengan simulasi Monte Carlo sebagai pendekatan probabilistik untuk menganalisis susut teknis pada jaringan distribusi PT PLN (Persero) ULP Sape, sekaligus mengevaluasi pengaruh variabel energi tersalur, kondisi tegangan, pembebanan transformator, dan komposisi pembebanan pelanggan terhadap perubahan persentase susut teknis menggunakan Standardized Regression Coefficient (SRC). Rumusan masalah penelitian ini adalah: (1) berapa besar susut teknis pada jaringan distribusi ULP Sape berdasarkan Formula Jogja; (2) bagaimana karakteristik perubahan susut teknis berdasarkan simulasi Monte Carlo; (3) variabel apa yang paling dominan memengaruhi perubahan persentase susut teknis berdasarkan SRC; dan (4) bagaimana hasil integrasi pendekatan deterministik dan probabilistik dalam mengevaluasi susut teknis. Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis besarnya susut teknis, mengevaluasi karakteristik probabilistiknya, mengidentifikasi variabel paling dominan, serta mengevaluasi integrasi kedua pendekatan tersebut guna mendukung penyusunan strategi pengelolaan susut teknis pada sistem distribusi PT PLN (Persero).

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoretis maupun praktis. Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi memperkaya kajian mengenai evaluasi susut teknis jaringan distribusi melalui pendekatan yang mengombinasikan metode deterministik dan

probabilistik, yang masih relatif jarang diterapkan secara terintegrasi pada studi kasus sistem distribusi di lingkungan PT PLN (Persero). Secara praktis, hasil analisis diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi PT PLN (Persero), khususnya ULP Sape, dalam menentukan prioritas program peningkatan efisiensi jaringan distribusi, seperti pengaturan pembebanan transformator, pengelolaan kualitas tegangan, evaluasi kebutuhan penambahan penyulang, serta pengembangan jaringan tegangan rendah sesuai karakteristik pembebanan sistem, sekaligus menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang mengembangkan analisis susut teknis dengan pendekatan probabilistik yang lebih komprehensif.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Sape yang berada di bawah UP3 Bima, UIW Nusa Tenggara Barat, dengan pertimbangan bahwa sistem distribusi di wilayah tersebut berkonfigurasi radial dengan panjang penyulang yang relatif besar dan hanya disuplai oleh satu gardu induk. Penelitian dilaksanakan selama lima bulan (1 Januari–31 Mei 2026), mencakup pengumpulan data, pengolahan data, perhitungan susut teknis menggunakan Formula Jogja, simulasi Monte Carlo, analisis sensitivitas SRC, serta analisis hasil penelitian, dengan menggunakan data operasional periode Januari–April 2026.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang mengombinasikan metode deterministik (Formula Jogja) dan probabilistik (simulasi Monte Carlo), dilanjutkan dengan analisis sensitivitas SRC. Data yang digunakan terdiri atas data primer (hasil pengamatan lapangan terkait profil tegangan dan kondisi operasi transformator) dan data sekunder (dokumen operasional, basis data aset, dan laporan penjualan energi PT PLN (Persero) ULP Sape), yang dikumpulkan melalui dokumentasi, observasi, dan studi literatur. Rincian data penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Penelitian

No	Data Penelitian	Sumber Data	Pemanfaatan
1	Energi tersalur	PT PLN (Persero) ULP Sape	Input Formula Jogja dan variabel simulasi Monte Carlo
2	Penjualan energi pelanggan TM dan TR	PT PLN (Persero) ULP Sape	Perhitungan susut teknis dan komposisi pembebanan pelanggan
3	Tegangan Jaringan Tegangan Menengah (TM)	Data pengukuran/operasi PLN	Variabel simulasi Monte Carlo
4	Tegangan Jaringan Tegangan Rendah (TR)	Data pengukuran lapangan	Variabel simulasi Monte Carlo
5	Pembebanan transformator distribusi	Data operasi transformator	Variabel simulasi Monte Carlo
6	Panjang Jaringan Tegangan Menengah (JTM)	Data aset jaringan	Perhitungan susut teknis Formula Jogja
7	Panjang Jaringan Tegangan Rendah (JTR)	Data aset jaringan	Perhitungan susut teknis Formula Jogja
8	Data transformator distribusi	Data aset transformator	Perhitungan susut teknis gardu distribusi

No	Data Penelitian	Sumber Data	Pemanfaatan
9	Komposisi pembebanan pelanggan	Data penjualan energi	Variabel simulasi Monte Carlo

Sumber: data diolah.

Tahapan analisis data diawali dengan pengolahan data awal (pemeriksaan kelengkapan, format, dan konsistensi data), dilanjutkan dengan perhitungan susut teknis menggunakan Formula Jogja pada setiap komponen jaringan (JTM, gardu distribusi, JTR, dan SR) sebagai kondisi dasar (baseline). Selanjutnya, variabel yang bersifat dinamis (energi tersalur, tegangan TM, tegangan TR, pembebanan transformator, dan komposisi pembebanan pelanggan) ditentukan distribusi probabilitasnya berdasarkan nilai rata-rata dan simpangan baku data historis, yang seluruhnya mengikuti distribusi normal. Variabel yang bersifat tetap seperti panjang JTM, panjang JTR, jumlah jurusan, jumlah gardu, kapasitas transformator, dan jumlah penyulang diperlakukan sebagai parameter skenario.

Simulasi Monte Carlo dijalankan sebanyak 10.000 iterasi pada tiga skenario jumlah penyulang, yaitu Skenario 1 (2 penyulang/kondisi pemeliharaan gardu induk), Skenario 2 (4 penyulang/kondisi eksisting), dan Skenario 3 (7 penyulang/potensi pengembangan jaringan). Pada setiap iterasi, nilai variabel acak dibangkitkan menggunakan fungsi RAND() dan NORM.INV() pada Microsoft Excel, kemudian dimasukkan secara berurutan ke dalam perhitungan Formula Jogja mulai dari susut JTM, gardu distribusi, JTR, hingga SR untuk memperoleh total susut teknis pada iterasi tersebut. Uji konvergensi dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata susut teknis pada beberapa jumlah iterasi (500, 1.000, 2.500, 5.000, dan 10.000) untuk memastikan hasil simulasi telah stabil. Hasil simulasi selanjutnya dianalisis secara statistik deskriptif (mean, simpangan baku, minimum, maksimum, serta persentil P5, P50, dan P95), dan dilanjutkan dengan analisis sensitivitas menggunakan Standardized Regression Coefficient (SRC) melalui regresi linear berganda terhadap data hasil simulasi yang telah distandardisasi (Z-Score), guna mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap perubahan persentase susut teknis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Sistem Distribusi ULP Sape

PT PLN (Persero) ULP Sape melayani wilayah kerja yang meliputi Kecamatan Sape, Lambu, Wera, Ambalawi, Wawo, dan Langgudu di bagian timur Kabupaten Bima, dengan kondisi geografis yang luas sehingga jaringan distribusi yang dioperasikan relatif panjang. Sistem distribusi ULP Sape disuplai dari 1 Gardu Induk (GI Sape) melalui 4 penyulang, yaitu Penyulang Wawo, Mangge, Pai, dan Express Sape; penyulang Express Sape selanjutnya dibagi menjadi 3 outlet (Sari, Sumi, dan Naru) melalui 1 Gardu Hubung (GH) di Kantor ULP Sape. Terdapat pula 1 penyulang tambahan (Penyulang Kolo) yang dilewatkan melalui exim namun tercatat sebagai aset ULP lain. Dengan total aset 5 penyulang dan panjang jaringan 333 kms, rata-rata panjang jaringan per penyulang mencapai 66 kms, yang tergolong panjang dan berpotensi meningkatkan susut daya. ULP Sape memiliki 229 unit transformator distribusi dengan kapasitas rata-rata 95 kVA (nominal 100 kVA), beban rata-rata 33%, dan 422 jurusan JTR. Profil sistem distribusi ULP Sape disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Profil Sistem Distribusi ULP Sape

Parameter	Nilai
Jumlah Gardu Induk	1 (GI Sape)
Jumlah Penyulang	5 (4 aktif + 1 penyulang exim)
Panjang Jaringan Total	333 kms
Rata-rata Panjang Jaringan per Penyulang	66 kms
Jumlah Transformator Distribusi	229 unit
Kapasitas Rata-rata Transformator	95 kVA (nominal 100 kVA)
Beban Rata-rata Transformator	33%
Jumlah Jurusan JTR	422 jurusan
Jumlah Pelanggan Tegangan Rendah	57.961 pelanggan
Jumlah Pelanggan Tegangan Menengah	17 pelanggan
Kontribusi Penjualan Energi Pelanggan TM	1.753.390 kWh (26% dari total energi terjual)
Tegangan Pangkal Rata-rata (GI Sape)	20,99 kV
Beban Rata-rata Penyulang Express Sape	3,77 MW
Beban Rata-rata Penyulang Pai	2,00 MW
Beban Rata-rata Penyulang Mangge	1,60 MW
Beban Rata-rata Penyulang Wawo	0,68 MW

Sumber: PT PLN (Persero) ULP Sape, data operasional Januari–April 2026, data diolah.

Perhitungan Susut Teknis Menggunakan Formula Jogja

Perhitungan susut teknis menggunakan Formula Jogja dilakukan berdasarkan data transaksi energi (kWh siap salur, kWh PSSD, kWh penjualan, dan kWh Emin) serta data teknik (panjang jaringan, jumlah penyulang, jumlah transformator, jumlah jurusan, kapasitas transformator, tahanan penghantar, tegangan, dan faktor daya) pada periode penelitian. Contoh perhitungan untuk bulan Januari 2026 menunjukkan kWh siap salur sebesar 7.078.711 kWh, dengan susut total (teknis dan nonteknis) sebesar 433.046 kWh atau 6,12% terhadap kWh siap salur, diperoleh dari selisih antara kWh siap salur dengan kWh PSSD, kWh penjualan, dan kWh Emin.

Perhitungan pada setiap komponen jaringan menggunakan parameter beban puncak ekivalen (Pek), Loss Load Factor (LLF), resistansi ekivalen penghantar, serta faktor koreksi masing-masing komponen sesuai pedoman teknis formula susut jaringan PLN (PLN, 2017). Hasil perhitungan susut teknis pada bulan Januari 2026 untuk setiap komponen jaringan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Susut Teknis Formula Jogja – Januari 2026

Komponen Jaringan	Parameter Kunci	Susut Energi (kWh)
Jaringan Tegangan Menengah (JTM)	Pek = 2.107 kVA; Prp = 77,45 kW	110.089
Gardu Distribusi (Transformator)	kVA trafo = 31,01; P trafo = 1,9 kW	91.678
Jaringan Tegangan Rendah (JTR)	Pek = 26,02 kVA; P JTR = 0,78 kW	61.406

Komponen Jaringan	Parameter Kunci	Susut Energi (kWh)
Sambungan Rumah (SR)	Pek = 0,31 kVA; P SR = 0,00137 kW	101.644
Total Susut Teknis (4 Komponen)	–	364.817 (≈ 5,15% dari kWh siap salur)

Sumber: hasil perhitungan Formula Jogja berdasarkan data operasional ULP Sape, data diolah.

Berdasarkan Tabel 3, kontribusi susut teknis terbesar pada bulan Januari 2026 terjadi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM), diikuti oleh Sambungan Rumah (SR), gardu distribusi, dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR), dengan total susut teknis keempat komponen tersebut sekitar 364.817 kWh atau setara 5,15% terhadap kWh siap salur, sementara selisih terhadap total susut 6,12% mencerminkan adanya komponen susut nonteknis. Sebagai baseline simulasi Monte Carlo, perhitungan Formula Jogja pada kondisi aktual bulan Maret 2026 menghasilkan total susut teknis sebesar 418.147 kWh atau 5,87% terhadap kWh siap salur, yang selanjutnya digunakan sebagai nilai pembanding terhadap hasil simulasi probabilistik.

Analisis Pengaruh Variabel Sistem Distribusi

Selain menghitung kondisi aktual, dilakukan pula analisis skenario terhadap beberapa variabel sistem distribusi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap besarnya susut teknis, dengan mengubah satu variabel secara bertahap sementara variabel lainnya dipertahankan tetap. Variabel yang dianalisis meliputi panjang jaringan tegangan menengah, jumlah penyulang, tingkat pembebanan transformator, panjang dan jumlah jurusan JTR, komposisi pembebanan pelanggan TM dan TR, serta kondisi tegangan TM dan TR.

Hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah penyulang memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap susut teknis: pada kondisi pemeliharaan gardu induk (2 penyulang), potensi susut meningkat menjadi 11,57%, sedangkan penambahan penyulang menjadi 7 penyulang berpotensi menurunkan susut teknis menjadi 4,71%, dibandingkan kondisi eksisting pada saat penelitian sebesar 5,78%. Pada sisi jaringan tegangan rendah, penambahan panjang JTR sebesar 15 kms berpotensi menaikkan susut teknis dari 5,78% menjadi 5,79% (naik 0,01%), sedangkan penambahan jumlah jurusan JTR berpotensi menurunkan susut teknis dari 5,78% menjadi 5,72% (turun 0,06%). Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan jurusan JTR lebih efektif menurunkan susut dibandingkan sekadar memperpanjang jaringan. Pada variabel tegangan, penurunan tegangan TM maupun TR cenderung menaikkan susut teknis meskipun dengan tingkat signifikansi yang berbeda antarvariabel, sedangkan variabel panjang JTM, pembebanan transformator, dan komposisi pembebanan pelanggan TM/TR menunjukkan pola pengaruh yang searah dengan teori namun dengan besaran yang bervariasi pada setiap skenario.

Berdasarkan seluruh skenario tersebut, disusun peringkat variabel berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap susut teknis sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Peringkat Pengaruh Variabel Terhadap Susut Teknis (Analisis Deterministik)

Variabel	Tingkat Pengaruh	Peringkat
Energi Tersalur	Tinggi	1
Jumlah Penyulang	Tinggi	2
Komposisi Penjualan TM dan TR	Tinggi	3

Variabel	Tingkat Pengaruh	Peringkat
Tegangan TM/TR	Sedang	4
Pembebanan Transformator	Rendah	5
Panjang JTM	Rendah	6
Panjang dan Jumlah Jurusan JTR	Rendah	7

Sumber: hasil analisis skenario Formula Jogja, data diolah.

Hasil analisis deterministik menunjukkan bahwa energi tersalur, jumlah penyulang, dan komposisi penjualan TM terhadap TR merupakan variabel dengan pengaruh tertinggi terhadap perubahan susut teknis, diikuti oleh tegangan TM/TR pada tingkat sedang, sedangkan pembebanan transformator serta panjang dan jumlah jurusan JTR memberikan pengaruh yang relatif rendah pada rentang skenario yang digunakan.

Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo dilakukan sebanyak 10.000 iterasi pada tiga skenario jumlah penyulang (2, 4, dan 7 penyulang) dengan lima variabel acak yang mengikuti distribusi normal, yaitu energi tersalur, tegangan TM, tegangan TR, pembebanan transformator, dan komposisi pembebanan pelanggan TM/TR, sedangkan variabel panjang JTM, panjang JTR, jumlah jurusan, jumlah gardu, kapasitas transformator, dan jumlah penyulang diperlakukan sebagai parameter tetap/skenario. Ringkasan variabel simulasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Variabel dalam Simulasi Monte Carlo

Jenis Variabel	Variabel	Perlakuan
Variabel Acak (Distribusi Normal)	Energi tersalur	Dibangkitkan dengan NORM.INV(RAND(), μ, σ)
	Tegangan TM	Dibangkitkan dengan NORM.INV(RAND(), μ, σ)
	Tegangan TR	Dibangkitkan dengan NORM.INV(RAND(), μ, σ)
	Pembebanan transformator	Dibangkitkan dengan NORM.INV(RAND(), μ, σ)
	Komposisi pembebanan pelanggan TM/TR	Dibangkitkan dengan NORM.INV(RAND(), μ, σ)
Parameter Tetap/Skenario	Panjang JTM, panjang JTR, jumlah jurusan, jumlah gardu, kapasitas transformator, jumlah penyulang	Ditetapkan sesuai skenario (2/4/7 penyulang)

Sumber: hasil olah data simulasi Monte Carlo, data diolah.

Uji konvergensi dilakukan pada Skenario 2 (kondisi eksisting, 4 penyulang) dengan membandingkan rata-rata susut teknis pada jumlah iterasi 500, 1.000, 2.500, 5.000, dan 10.000. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata susut teknis meningkat secara bertahap dari 5,5229% pada 500 iterasi menjadi 5,5305% pada 10.000 iterasi, sedangkan besarnya perubahan

nilai rata-rata antarjumlah iterasi terus menurun dari 0,0555% menjadi 0,0235%, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen pada 10.000 iterasi.

Hasil simulasi Monte Carlo pada kondisi jaringan eksisting menunjukkan rata-rata total susut teknis sebesar 5,53%, dengan nilai minimum 5,20% dan maksimum 6,01%, serta simpangan baku 0,09% yang menunjukkan hasil simulasi terkonsentrasi di sekitar nilai rata-rata. Nilai persentil P5 sebesar 5,39%, P50 sebesar 5,53%, dan P95 sebesar 5,68% menunjukkan bahwa sekitar 90% hasil simulasi berada pada rentang 5,39%–5,68%, sedangkan kesamaan nilai rata-rata dan P50 menunjukkan distribusi total susut teknis yang relatif seimbang. Statistik hasil simulasi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Statistik Hasil Simulasi Monte Carlo Total Susut Teknis (10.000 Iterasi)

Statistik	Nilai
Rata-rata (Mean)	5,53%
Minimum	5,20%
Maksimum	6,01%
Simpangan Baku	0,09%
Persentil P5	5,39%
Persentil P50 (Median)	5,53%
Persentil P95	5,68%

Sumber: hasil olah data simulasi Monte Carlo, data diolah.

Berdasarkan komponennya, rata-rata susut terbesar terjadi pada JTM sebesar 1,97%, diikuti SR sebesar 1,50%, gardu distribusi sebesar 1,36%, dan JTR sebesar 0,71%, sehingga JTM menjadi komponen dengan kontribusi terbesar terhadap total susut teknis sedangkan JTR memberikan kontribusi terkecil. Rentang P5–P95 pada setiap komponen disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi Probabilistik Susut Teknis per Komponen Jaringan

Komponen	Rata-rata (%)	Rentang P5–P95 (%)
JTM	1,97	1,73 – 2,22
Gardu Distribusi	1,36	1,24 – 1,50
JTR	0,71	0,59 – 0,83
Sambungan Rumah (SR)	1,50	1,31 – 1,70
Total	5,53	5,39 – 5,68

Sumber: hasil olah data simulasi Monte Carlo, data diolah.

Analisis Sensitivitas Standardized Regression Coefficient (SRC)

Analisis sensitivitas menggunakan Standardized Regression Coefficient (SRC) dilakukan terhadap hasil simulasi Monte Carlo untuk mengetahui kontribusi relatif setiap variabel terhadap perubahan persentase total susut teknis. Hasil regresi menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8409, yang berarti sekitar 84,09% variasi persentase total susut teknis dapat dijelaskan oleh energi tersalur, tegangan TM, tegangan TR, pembebanan

transformator, dan komposisi pelanggan TM, dengan hasil uji F yang signifikan sehingga model regresi layak digunakan untuk analisis sensitivitas.

Nilai SRC menunjukkan bahwa energi tersalur, tegangan sisi tegangan menengah, dan tegangan sisi tegangan rendah merupakan variabel yang memberikan kontribusi terbesar terhadap perubahan persentase total susut teknis, sedangkan pembebanan transformator dan komposisi pelanggan tegangan menengah memberikan kontribusi yang relatif lebih kecil. Perbedaan tersebut terjadi karena simulasi Monte Carlo mengevaluasi seluruh variabel secara simultan sehingga kontribusi setiap variabel turut dipengaruhi oleh interaksinya dengan variabel lain dalam model. Ringkasan hasil analisis SRC disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Analisis Sensitivitas SRC

Indikator	Nilai/Keterangan
Koefisien Determinasi (R^2)	0,8409 (84,09% variasi dijelaskan model)
Signifikansi Model (Uji F)	Signifikan
Variabel Kontribusi Terbesar	Energi tersalur, tegangan TM, tegangan TR
Variabel Kontribusi Relatif Kecil	Pembebanan transformator, komposisi pelanggan TM

Sumber: hasil analisis regresi SRC terhadap data simulasi Monte Carlo, data diolah.

Hasil analisis SRC ini melengkapi hasil analisis deterministik pada Sub Bab 4.3: analisis deterministik menunjukkan arah pengaruh setiap variabel ketika diubah secara individual, sedangkan analisis SRC menunjukkan kontribusi relatif setiap variabel ketika seluruh variabel berubah secara simultan sesuai distribusi probabilitasnya, sehingga kedua pendekatan saling melengkapi dalam menjelaskan karakteristik susut teknis jaringan distribusi. Perbandingan antara kedua metode menunjukkan hasil yang secara umum konsisten, kecuali pada variabel komposisi pelanggan TM dan TR yang berpengaruh secara deterministik namun tidak berpengaruh secara Monte Carlo, karena secara matematis variabel tersebut menjadi pengurang pada energi siap salur yang diterima transformator, namun tidak memengaruhi nilai susut secara langsung dalam struktur perhitungan probabilistik.

Ringkasan Temuan dan Implikasi

Ringkasan temuan penelitian yang mengintegrasikan pendekatan deterministik (Formula Jogja) dan probabilistik (Monte Carlo) disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Ringkasan Temuan Penelitian

Aspek	Hasil Utama	Implikasi
Formula Jogja	Mampu menghitung susut teknis tiap komponen jaringan	Digunakan sebagai model dasar perhitungan
Monte Carlo	Menghasilkan distribusi probabilistik susut teknis	Memberikan informasi ketidakpastian sistem
Uji Konvergensi	Simulasi stabil pada 10.000 iterasi	Jumlah iterasi dinilai memadai
Distribusi Probabilistik	Rata-rata susut teknis sekitar 5,53% dengan rentang sesuai hasil simulasi	Menunjukkan variasi susut yang mungkin terjadi

Aspek	Hasil Utama	Implikasi
Analisis Sensitivitas (SRC)	Energi tersalur dan kondisi tegangan merupakan variabel paling dominan	Prioritas pengelolaan difokuskan pada pengendalian energi dan profil tegangan
Kontribusi Penelitian	Integrasi Formula Jogja dengan simulasi Monte Carlo	Menyediakan pendekatan yang lebih komprehensif dalam analisis susut teknis

Sumber: data diolah.

Berdasarkan temuan tersebut, disusun rekomendasi pengelolaan susut teknis pada beberapa bidang operasional sebagaimana disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Rekomendasi Pengelolaan Susut Teknis PLN ULP Sape

Bidang	Rekomendasi
Operasi	Monitoring energi tersalur, tegangan TM dan TR
Pemeliharaan	Pengaturan tap trafo
Perencanaan	Penambahan penyulang
Investasi	Penambahan jurusan JTR dan penambahan pelanggan TM
Pelayanan	Pengelolaan komposisi pelanggan TM sebagai pelanggan Key Account

Sumber: data diolah.

Secara praktis, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan susut teknis memerlukan kombinasi pengendalian operasi harian dan perencanaan pengembangan jaringan. Monitoring energi tersalur perlu dilakukan secara berkelanjutan, sedangkan pengaturan tegangan melalui transformator distribusi maupun gardu induk diperlukan untuk mempertahankan kualitas tegangan pada sisi pelanggan, terutama pelanggan TM yang berperan besar terhadap tingkat penjualan energi unit. Selain itu, hasil analisis deterministik menunjukkan bahwa penambahan penyulang dan jurusan JTR tetap menjadi alternatif efektif untuk menurunkan susut teknis pada daerah dengan jaringan panjang seperti ULP Sape.

Pembahasan Komparatif dengan Penelitian Terdahulu

Temuan penelitian ini memperkuat sekaligus melengkapi hasil penelitian terdahulu mengenai susut teknis jaringan distribusi. Sejalan dengan Rahmani (2024) yang menemukan bahwa panjang jaringan, arus pembebanan, dan konfigurasi penyulang menjadi faktor utama susut teknis pada PT PLN (Persero) UP3 Semarang, hasil analisis deterministik pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa jumlah penyulang memberikan pengaruh yang besar terhadap susut teknis ULP Sape, di mana pengurangan menjadi 2 penyulang berpotensi menaikkan susut hingga 11,57% sedangkan penambahan menjadi 7 penyulang berpotensi menurunkannya menjadi 4,71%. Kesamaan pola ini menegaskan bahwa konfigurasi dan panjang penyulang merupakan faktor struktural yang konsisten memengaruhi susut teknis pada berbagai wilayah kerja PLN, sebagaimana juga ditunjukkan oleh Salkuti dan Battu (2021) bahwa rekonfigurasi jaringan radial mampu meminimalkan rugi-rugi daya sekaligus memperbaiki profil tegangan sistem.

Pada aspek transformator distribusi, temuan mengenai kontribusi gardu distribusi terhadap total susut teknis (rata-rata 1,36% dari total 5,53%) sejalan dengan Agung dkk. dan Wiranto dkk. yang menunjukkan bahwa karakteristik dan tingkat pembebanan transformator berpengaruh terhadap besarnya rugi-rugi energi pada gardu distribusi, meskipun pada penelitian ini kontribusi transformator relatif lebih kecil dibandingkan komponen JTM karena karakteristik penyulang ULP Sape yang panjang menyebabkan rugi-rugi penghantar JTM menjadi lebih dominan. Pada sisi jaringan tegangan rendah, hasil analisis sensitivitas SRC yang menunjukkan tegangan TR sebagai salah satu variabel paling dominan turut menguatkan temuan Tobing (2022) bahwa panjang jaringan tegangan rendah serta distribusi pelanggan memengaruhi besarnya susut teknis pada level tegangan rendah, sehingga pengelolaan kualitas tegangan pada sisi JTR menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan bersama pengelolaan energi tersalur.

Dibandingkan dengan penelitian yang menerapkan simulasi Monte Carlo pada aspek keamanan sistem tenaga dan kajian finansial infrastruktur ketenagalistrikan, sebagaimana dilakukan Kim dan Hur (2020) serta pada kajian risiko tekno-ekonomi dan finansial proyek HVDC, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik yang sama juga relevan diterapkan pada evaluasi susut teknis jaringan distribusi. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8409 pada analisis SRC menunjukkan bahwa model probabilistik yang dibangun mampu menjelaskan sebagian besar variasi susut teknis, sehingga memperkuat argumen bahwa integrasi metode deterministik seperti Formula Jogja dengan simulasi Monte Carlo mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif dibandingkan apabila kedua pendekatan tersebut diterapkan secara terpisah. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi mengisi celah penelitian terdahulu yang masih relatif terbatas dalam mengintegrasikan pendekatan deterministik dan probabilistik untuk analisis susut teknis jaringan distribusi, khususnya pada wilayah dengan karakteristik penyulang panjang seperti ULP Sape.

KESIMPULAN

Berdasarkan integrasi Formula Jogja dan simulasi Monte Carlo terhadap sistem distribusi PT PLN (Persero) ULP Sape periode Januari–April 2026, dapat disimpulkan bahwa susut teknis jaringan distribusi dipengaruhi oleh karakteristik jaringan dan kondisi operasi secara bersamaan, dengan Formula Jogja menghasilkan susut teknis dasar sekitar 5,87% pada kondisi aktual dan simulasi Monte Carlo sebanyak 10.000 iterasi menunjukkan rata-rata total susut teknis sebesar 5,53% pada rentang 5,20%–6,01% (P5–P95: 5,39%–5,68%), dengan Jaringan Tegangan Menengah (JTM) sebagai komponen penyumbang susut terbesar. Analisis sensitivitas Standardized Regression Coefficient (SRC) dengan R^2 sebesar 0,8409 menunjukkan bahwa energi tersalur, tegangan tegangan menengah, dan tegangan tegangan rendah merupakan variabel paling dominan memengaruhi perubahan persentase susut teknis, sedangkan pembebanan transformator dan komposisi pelanggan tegangan menengah memberikan pengaruh relatif kecil; analisis deterministik menambahkan bahwa jumlah penyulang turut berperan besar, di mana pengurangan menjadi 2 penyulang berpotensi menaikkan susut menjadi 11,57% sedangkan penambahan menjadi 7 penyulang berpotensi menurunkannya menjadi 4,71%. Integrasi kedua pendekatan tersebut memberikan gambaran yang lebih komprehensif dibandingkan metode deterministik saja karena mampu menjelaskan baik arah pengaruh individual maupun kontribusi relatif setiap variabel secara simultan.

Berdasarkan temuan tersebut, PT PLN (Persero) disarankan memprioritaskan monitoring energi tersalur serta pengendalian kualitas tegangan TM dan TR melalui pengaturan tap trafo, mengevaluasi penambahan penyulang dan jurusan JTR secara berkala terutama pada wilayah berjaringan panjang seperti ULP Sape, serta mengelola komposisi pelanggan tegangan menengah sebagai pelanggan Key Account mengingat kontribusinya yang signifikan terhadap penjualan energi. Pendekatan Monte Carlo disarankan menjadi metode pendukung baku dalam evaluasi susut teknis karena mampu memperhitungkan variasi kondisi operasi yang tidak terjangkau pendekatan deterministik. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode data yang lebih panjang, menambahkan variabel seperti temperatur penghantar, cuaca, pertumbuhan beban, dan penetrasi pembangkit energi terbarukan, serta mengintegrasikan simulasi dengan perangkat lunak analisis sistem tenaga dan metode kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi prediksi susut teknis pada jaringan distribusi.

REFERENSI

Agung, M., Mulia, S., Sunanda, W., & Arkan, F. (n.d.). *Studi komparasi efisiensi trafo distribusi pada PLN unit layanan pelanggan Pangkalpinang* (pp. 1–4). Jurusan Teknik Elektro, Universitas Bangka Belitung.

Alqahtani, M., Marimuthu, P., Moorthy, V., Pangedaiah, B., Rami Reddy, C., Kiran Kumar, M., & Khalid, M. (2023). Investigation and minimization of power loss in radial distribution network using gray wolf optimization. *Energies*, *16*(12), 4571. https://doi.org/10.3390/en16124571

Imran, R. M., Saeed, M. R., Mohammed, M. A., Suhry, O. A., Abdulqadder, I. H., Salih, H. W., & Almallah, M. R. (2022). Voltage profile enhancement and power loss reduction with economic feasibility using small capacity distribution transformers. *Energy Engineering*, *119*(6), 2447–2467. https://doi.org/10.32604/ee.2022.021871

Khalid, S., Raza, A., Yousaf, M. Z., Mirsaeidi, S., & Zhichu, C. (2023). Recent advances and future perspectives of HVDC development in Pakistan: A scientometric analysis based comprehensive review. *IEEE Access*, *11*, 56408–56427. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3283431

Kim, S., & Hur, J. (2020). *A probabilistic modeling based on Monte Carlo simulation of wind powered EV charging stations for steady-states security analysis*.

Li, Z., Li, C., Zhang, B., Duan, Q., Liu, L., Zu, G., & Li, Q. (2023). Research on new energy vehicle charging prediction based on Monte Carlo algorithm and its impact on distribution network. *Frontiers in Energy Research*, *11*, 1269041. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1269041

Menggunakan, T., & Monte, S. (2025). *Analisis risiko tekno-ekonomi untuk Jakarta 2025*.

Otuo-Acheampong, D., & Hussain, S. (2023). Application of optimal network reconfiguration for loss minimization and voltage profile enhancement of distribution system using heap-based optimizer. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *2023*, 9930954. https://doi.org/10.1155/2023/9930954

Penerapan, A., & Monte, M. (2025). *Dalam kajian finansial proyek infrastruktur ketenagalistrikan HVDC 500kV interkoneksi*.

PLN. (n.d.). *Buku 1 Kriteria Disain Enjinering* (PLN (Ed.); 1st ed.). PLN.

PLN. (1991). Perusahaan Umum Listrik Negara. In *SPLN 87*. PLN.

PLN. (2017). *Peraturan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0021.P/DIR/2018*. PT PLN (Persero).

Rahmani, I. N. (2024). *Pada jaringan tegangan menengah PT PLN (Persero) UP3 Semarang*. Program Studi Magister Teknik, Sekolah Pascasarjana.

Salkuti, S. R., & Battu, N. R. (2021). An effective network reconfiguration approach of radial distribution system for loss minimization and voltage profile improvement. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, *10*(4). https://doi.org/10.11591/eei.v10i4.2867

Syukri, S., Asyadi, T. M., Muliadi, M., & Moesnadi, F. (2022). Analisa pembebanan transformator distribusi 20 kV pada penyulang LS5 Gardu LSA 249. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *4*(2), 202–206. https://doi.org/10.37905/jjeee.v4i2.14500

Tobing, M. P. L. (2022). *Pengelolaan pelanggan dan pemetaan susut teknis jaringan tegangan rendah di PLN UP3 Belitung*. Fakultas Ketenagalistrikan, Institut Teknologi PLN Jakarta.

Wei, N., Zhang, L., Liu, S., & Ye, H. (2023). Unlocking inter-regional flexibility for the HVDC-connected two-area system with a multistage model. *Frontiers in Energy Research*, *11*, 1323919. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1323919

Wiranto, M. I., Patras, L. S., & Silimang, S. (n.d.). *Analisa kinerja transformator distribusi Kawanua Emerald City - Amethyst*. Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sam Ratulangi Manado.

Yasa, I. W. S., Wirajaya, A., & Adrama, I. N. (2024). Analisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Bangli. *Journal of Electrical and System Control Engineering*, *8*(1), 141–154. https://doi.org/10.31289/jesce.v8i1.11992

Yuvaraj, T., Meyyappan, S. T. D. U., Aljafari, B., & Thanikanti, S. B. (2023). Optimizing the allocation of renewable DGs, DSTATCOM, and BESS to mitigate the impact of electric vehicle charging stations on radial distribution systems. *Heliyon*, *9*(11), e23017. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23017