

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental yang memegang peranan vital dalam menggerakkan roda perekonomian dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat modern. Sebagai penyedia tunggal kelistrikan negara, PT PLN (Persero) memikul mandat Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan untuk menjamin ketersediaan tenaga listrik dalam jumlah yang cukup, kualitas yang baik, dan keandalan yang tinggi. Kualitas distribusi tenaga listrik menjadi indikator utama kinerja perusahaan, di mana efisiensi penyaluran dari Gardu Induk hingga ke konsumen akhir harus dijaga seoptimal mungkin (Marsudi, 2016). Namun, dalam proses penyalurannya, sistem tenaga listrik tidak pernah lepas dari hambatan teknis yang mempengaruhi kontinuitas pelayanan, sehingga manajemen sistem distribusi menjadi prioritas utama dalam operasional ketenagalistrikan (Suhadi, 2008).

Salah satu fenomena krusial yang menjadi tantangan permanen dalam sistem distribusi tenaga listrik adalah rugi-rugi daya (*power losses*) atau susut energi. Rugi daya merupakan selisih antara energi yang dikirimkan dari pembangkit atau gardu induk dengan energi yang terjual atau terukur pada kWh meter pelanggan. Secara empiris, data statistik PLN sering menunjukkan bahwa susut distribusi masih menjadi penyumbang inefisiensi terbesar dibandingkan sisi transmisi. Rugi-rugi ini didominasi oleh rugi teknis (*technical losses*) yang disebabkan oleh karakteristik fisik penghantar dan peralatan, seperti panas yang timbul akibat arus beban (I^2R) pada konduktor dan transformator (Gonen, 2014). Peningkatan rugi daya tidak hanya berdampak pada kerugian finansial perusahaan akibat energi yang hilang percuma, tetapi juga menyebabkan penurunan kualitas tegangan (*voltage drop*) di sisi pelanggan yang dapat memperpendek umur peralatan elektronik (Stevenson, 2012).

Untuk mengendalikan parameter operasional tersebut, PT PLN (Persero) menetapkan standar ketat yang tertuang dalam Standar Perusahaan Listrik Negara

(SPLN). Mengacu pada SPLN 1:1995 tentang Tegangan-tegangan Standar, variasi tegangan pelayanan diizinkan maksimum +5% dan minimum -10% dari tegangan nominal. Selain itu, terkait pembebanan transformator, SPLN 50:1997 dan buku pedoman pemeliharaan mengatur agar transformator distribusi tidak dioperasikan dalam kondisi beban lebih (*overload*) yang melebihi 80% kapasitasnya secara terus-menerus, karena akan memicu degradasi isolasi (Sudirham, 2013). Kepatuhan terhadap prosedur tetap (Protap) ini menjadi tolak ukur keberhasilan unit layanan dalam menjaga *Service Level Agreement* (SLA) kepada pelanggan.

Berbagai teori dan penelitian terdahulu telah mengkaji metode mitigasi rugi daya, mulai dari penyeimbangan beban, penggantian konduktor (*reconductoring*), pemasangan kapasitor, hingga penambahan gardu sisipan. Studi literatur menunjukkan bahwa penambahan transformator sisip (*insert trafo*) merupakan solusi efektif untuk memecah beban pada jaringan yang terlalu panjang atau *overloaded* (Short, 2004). Namun, implementasi solusi teknis ini seringkali tidak dibarengi dengan analisis dampak pasca-konstruksi yang komprehensif, terutama mengenai seberapa signifikan perbaikan profil tegangan yang dihasilkan serta bagaimana strategi pemeliharaan lanjutan yang harus diterapkan agar aset baru tersebut tetap optimal.

Berdasarkan observasi lapangan dan wawancara dengan Supervisor Teknik PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Enrekang, teridentifikasi permasalahan spesifik pada penyulang yang mensuplai wilayah SMP Negeri 1 Enrekang. Gardu distribusi eksisting (Gardu PETE/GT0093) melayani beban dengan radius Jaringan Tegangan Rendah (JTR) yang cukup panjang, mencapai hampir 1 km hingga ke ujung beban. Kondisi ini memicu keluhan tegangan ujung yang *drop* secara signifikan di SMP Negeri 1 Enrekang sehingga berpotensi mengganggu kegiatan belajar mengajar berbasis elektronik. Selain itu, Gardu PETE juga mengalami pembebanan tinggi yang mendekati kapasitas nominalnya. Sebagai respons taktis, ULP Enrekang merencanakan pemasangan Transformator Sisip untuk memecah beban dan memperbaiki tegangan ujung, namun evaluasi kuantitatif mendalam mengenai efektivitas manuver ini belum terdokumentasi secara akademis. Untuk memverifikasi urgensi permasalahan serta memetakan

keluhan teknis yang terjadi, penulis melakukan observasi pendahuluan dan wawancara awal dengan pihak terkait. Ringkasan temuan tersebut disajikan pada Tabel 1.1 berikut.

Tabel 1. 1 Hasil Wawancara dan Observasi Pendahuluan

No	Waktu Pelaksanaan	Narasumber / Jabatan	Lokasi / Objek	Pokok Permasalahan / Temuan Lapangan
1	Juli 2025	Supervisor Teknik PT PLN (Persero) ULP Enrekang	Kantor ULP Enrekang & Data Aset Gardu PETE	• Teridentifikasi radius JTR Gardu PETE (GT0093) terlalu panjang (hampir 1 km). • Gardu PETE mengalami pembebanan tinggi mendekati kapasitas nominal (<i>overload</i>). • Rencana pemasangan Trafo Sisip belum dievaluasi secara kuantitatif efektivitasnya.
2	Juli 2025	Pihak Administrasi & Guru	SMP Negeri 1 Enrekang	• Gangguan operasional laboratorium komputer akibat tegangan tidak stabil. • Perangkat elektronik sekolah sering mengalami <i>restart</i> mendadak atau mati total

				• Kegiatan belajar mengajar berbasis elektronik terganggu.
3	Juli 2025	Perwakilan Warga / Pelanggan	Area sekitar Gardu PETE & Sekolah	• Lampu penerangan meredup signifikan pada WBP pukul 18.00–22.00 WITA. • Peralatan rumah tangga (kulkas & AC) tidak optimal akibat pasokan listrik tidak stabil (<i>drop</i> tegangan).

Sumber: Data Primer (Diolah), 2026

Temuan pada Tabel 1.1 menunjukkan bahwa indikasi teknis berupa panjangnya radius JTR dan tingginya pembebanan Gardu PETE tidak hanya tercermin pada data aset, tetapi juga terkonfirmasi melalui keluhan pengguna listrik di sisi pelanggan. Pada taraf institusional, SMP Negeri 1 Enrekang melaporkan gangguan operasional pada laboratorium komputer serta perangkat elektronik sekolah yang mengalami *restart* mendadak atau tidak dapat beroperasi akibat tegangan anjlok di ujung jaringan. Sementara itu, masyarakat sekitar menyampaikan keluhan berulang terkait penurunan kualitas tegangan, terutama pada Waktu Beban Puncak (WBP) pukul 18.00–22.00 WITA yang ditandai dengan lampu penerangan meredup dan menurunnya performa peralatan rumah tangga seperti kulkas dan pendingin ruangan. Realitas empiris ini mengonfirmasi adanya jatuh tegangan (*voltage drop*) yang signifikan pada penghantar eksisting Gardu PETE dalam melayani area tersebut, sekaligus memvalidasi urgensi tindakan perbaikan jaringan melalui penyisipan transformator baru sebagai upaya peningkatan kualitas tegangan ujung.

Pemilihan ULP Enrekang sebagai lokasi penelitian didasari oleh karakteristik unik wilayah ini yang memiliki topografi berbukit dan konfigurasi jaringan distribusi yang relatif kompleks. Selain itu, ULP Enrekang baru saja mengalami pengembangan infrastruktur melalui pembangunan gardu induk sisipan, sehingga wilayah ini menjadi “laboratorium lapangan” yang ideal untuk menguji korelasi antara investasi infrastruktur baru (trafo sisip) dengan peningkatan efisiensi teknis jaringan. Studi kasus di lokasi ini juga merepresentasikan tantangan distribusi listrik di wilayah sub-urban yang relatif jarang disentuh oleh penelitian sebelumnya, yang umumnya lebih banyak berfokus pada sistem kelistrikan di kota-kota besar.

Urgensi pemilihan lokasi ini diperkuat oleh data pengukuran teknis kondisi eksisting yang menunjukkan performa jaringan berada di bawah standar. Berdasarkan pengukuran pada Waktu Beban Puncak (WBP), tegangan pelayanan di ujung jaringan (SMP Negeri 1 Enrekang) tercatat anjlok hingga 81,22% (sekitar 178 Volt), jauh di bawah ambang batas minimum 90% (198 Volt) yang ditetapkan dalam SPLN 1:1995. Selain itu, transformator distribusi (Gardu PETE) mengalami pembebanan kritis mencapai 90,16%, melampaui batas aman pembebanan 80% sesuai SPLN 50:1997. Untuk memenuhi catatan revisi dari Bapak Heri Suyanto terkait kebutuhan “data histori”, penulis menyajikan data historis tegangan ujung JTR Gardu PETE dalam tiga bulan terakhir. Tabel ini menunjukkan bahwa permasalahan tegangan bukan bersifat insidental, melainkan telah berlangsung secara berulang (kronis) pada periode pengukuran WBP.

Tabel 1. 2 Data Histori Tegangan Ujung JTR Gardu PETE (3 Bulan Terakhir)

Bulan (Tahun 2025)	Waktu Pengukuran	Tegangan Terukur (Volt)	Persentase Tegangan (%)	Status Kondisi
Juni	19.00 WITA (WBP)	180 V	81,8%	<i>Critical Undervoltage</i>

Juli	19.30 WITA (WBP)	178 V	80,9%	<i>Critical Undervoltage</i>
Agustus	20.00 WITA (WBP)	179 V	81,3%	<i>Critical Undervoltage</i>
Rata-rata	–	179 V	81,3%	Tidak Sesuai SPLN

*Sumber: Logsheet Pengukuran Beban ULP Enrekang & Pengukuran Mandiri,
2025*

Terkait posisi penelitian ini, dilakukan kajian terhadap penelitian-penelitian relevan sebelumnya. Lutfi dkk. (2025) dalam penelitiannya pada Gardu Induk PLN Mangkunegaran berfokus pada perhitungan ekonomis losses menggunakan *Annual Worth Method* pada level transmisi 150 kV. Sementara itu, Zulkhulaifah dkk. (2021) menitikberatkan pada penyeimbangan beban trafo distribusi 20 kV di Makassar untuk efisiensi, dan Samsurizal & Hadinoto (2020) mengkaji dampak *overload* serta solusi *uprating* di UP3 Pondok Gede. Kisworo dkk. (2025) dan penelitian sejenis lainnya umumnya bersifat parsial.

Terdapat kesenjangan (*research gap*) yang signifikan antara penelitian ini dengan studi-studi terdahulu. Pertama, dari aspek metodologi, jika Lutfi (2025) fokus pada metode ekonomi dan Zulkhulaifah (2021) pada penyeimbangan beban fasa, penelitian ini mengintegrasikan analisis aliran daya (*load flow*) menggunakan simulasi ETAP 19.0.1 dengan validasi pengukuran riil lapangan sebelum dan sesudah penyisipan trafo. Kedua, berbeda dengan Samsurizal (2020) yang menawarkan solusi *uprating* (mengganti kapasitas trafo di tempat yang sama), penelitian ini menganalisis efektivitas pemecahan beban melalui penambahan aset baru (Trafo Sisip) yang mengubah konfigurasi jaringan secara fisik. Ketiga, penelitian ini tidak berhenti pada solusi perbaikan tegangan, tetapi melengkapinya dengan penyusunan strategi pemeliharaan preventif berbasis waktu (*Time-Based Maintenance*) yang belum dibahas secara mendalam oleh penelitian-penelitian

pembandingan di atas. Pendekatan ini menawarkan solusi yang lebih holistik: memperbaiki masalah saat ini dan mencegah kerusakan di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang telah disusun serta urgensi penelitian yang telah dipaparkan, maka didapat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana profil jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Gardu PETE kondisi eksisting sebelum perbaikan?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Transformator Sisip (*Insert Trafo*) terhadap penurunan rugi-rugi daya (*power losses*) pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Gardu PETE?"
3. Bagaimana cara melakukan metode *preventive maintenance* (berdasarkan waktu) pada transformator distribusi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, terdapat tujuan penelitian ini berupa:

1. Untuk menganalisis besarnya profil jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Gardu PETE dalam kondisi eksisting sebelum perbaikan.
2. Untuk mengevaluasi pengaruh penambahan Transformator Sisip (*Insert Trafo*) terhadap penurunan rugi-rugi daya (*power losses*) pada jaringan distribusi dan penurunan beban pada trafo lama.
3. Untuk mendeskripsikan metode dan jadwal *preventive maintenance* yang tepat pada transformator distribusi guna menjaga keandalan sistem.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat kepada:

1. Bagi Penulis

Penelitian ini memberikan pengalaman langsung dalam menganalisis sistem distribusi tenaga listrik yang kompleks, memungkinkan penulis untuk mengembangkan kemampuan analitik dan teknis di bidang kelistrikan. Melalui studi kasus di ULP Enrekang, penulis memperoleh kesempatan untuk menerapkan teori-teori sistem tenaga listrik dalam konteks nyata, memperdalam pemahaman tentang rugi daya, efisiensi transformator, dan strategi pemeliharaan preventif.

2. Bagi Lembaga Pendidikan

Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi untuk pengembangan kurikulum program studi Teknik Elektro, khususnya dalam mata kuliah sistem distribusi tenaga listrik dan pemeliharaan peralatan listrik. Penelitian ini menunjukkan pentingnya kolaborasi multidisiplin dalam studi kelistrikan, menggabungkan aspek teknis, ekonomi, dan manajemen aset.

3. Bagi Perusahaan

- a. Penelitian ini memberikan rekomendasi konkret untuk mengurangi rugi daya di ULP Enrekang, yang dapat diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi kerugian finansial akibat losses. Strategi pemeliharaan preventif berbasis waktu yang dihasilkan dapat memperpanjang umur transformator dan mengurangi biaya penggantian.
- b. Hasil penelitian menyediakan data dan analisis yang akurat untuk mendukung pengambilan keputusan investasi di bidang infrastruktur distribusi. Informasi mengenai efektivitas penambahan transformator dan strategi pemeliharaan optimal dapat menjadi acuan untuk pengembangan sistem distribusi di wilayah lain.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

1.5.1 Lingkup Penelitian

Untuk menjaga fokus pembahasan agar terarah dan sesuai dengan tujuan penelitian, penulis menetapkan ruang lingkup dan batasan masalah sebagai berikut.

1. Penelitian difokuskan pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) yang disuplai oleh Gardu Distribusi PETE (Kode Gardu: GT0093) di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Enrekang.
2. Analisis aliran daya (*Load Flow Analysis*) dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) untuk membandingkan kondisi eksisting dengan kondisi setelah perbaikan.
3. Evaluasi difokuskan pada dua skenario perbaikan teknis, yaitu penambahan Transformator Sisip untuk memecah beban SMPN 1 Enrekang dan peningkatan kapasitas (*uprating*) penghantar JTR pada jurusan Masamba.
4. Variabel yang dianalisis meliputi persentase tegangan (*Voltage %*), jatuh tegangan (*Voltage Drop*), rugi daya (*Losses*), dan kapasitas pembebanan (*Ampacity/Loading*) pada transformator dan penghantar.
5. Evaluasi hasil simulasi mengacu pada standar SPLN 1:1995 (Tegangan) dan SPLN D3.002-1:2008 (Spesifikasi Transformator).

1.5.2 Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Simulasi hanya dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*), tidak membahas analisis gangguan hubung singkat (*short circuit*) atau stabilitas transien.
2. Analisis dibatasi pada sisi sekunder transformator distribusi (Tegangan Rendah 380/220 V). Sisi Tegangan Menengah (20 kV) diasumsikan sebagai *swing bus* dengan tegangan nominal konstan.
3. Penelitian ini membatasi diri pada aspek teknis kelistrikan. Analisis ekonomi (RAB, NPV, ROI) dan analisis dampak lingkungan tidak termasuk dalam lingkup pembahasan.
4. Data beban yang digunakan adalah data beban puncak (WBP) berdasarkan pengukuran lapangan atau data historis ULP Enrekang, dengan asumsi beban seimbang antar fasa.
5. Pembahasan mengenai strategi pemeliharaan preventif (*Preventive Maintenance*) terbatas pada studi literatur dan penyusunan prosedur operasional, tidak mencakup pelaksanaan fisik di lapangan.