

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan kajian pustaka dengan menelaah sejumlah penelitian yang dianggap relevan sebagai bahan rujukan. Sumber referensi tersebut diperoleh dari berbagai literatur, baik berupa jurnal ilmiah, artikel, skripsi, maupun buku yang berkaitan dengan topik penelitian. Beberapa referensi yang berhasil dihimpun antara lain sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan oleh Denny Rusmansyah¹ ; Ibnu Hajar² ; Nurmiati Pasra³. JURNAL ILMIAH SUTET, Desember 2020 dengan judul *“Analisis Voltage Drop Pada Jaringan Tegangan Rendah Dengan Metode Pecah Beba Pada Gardu KH 007”* Pada jurnal ini lokasi penelitian yang mengalami gangguan voltage drop yaitu pada Desa Pakandangan Tengah. Menurut laporan yang diterima oleh PT PLN (Persero) UP3 Pamekasan terdapat banyak keluhan dari masyarakat telah terjadinya voltage drop pada daerah tersebut. Akibat voltage drop tersebut mengakibatkan gangguan pada alat-alat elektronik yang tidak bisa dioperasikan serta nyala lampu mengalami redup. Permasalahan dari voltage drop ini tentu saja harus segera diselesaikan dan diperbaiki, hal ini bukan hanya karena kepuasan pelanggan PLN tetapi juga agar nilai tegangan yang terjadi di desa tersebut bisa berada pada nilai ideal yang sudah ditentukan oleh SPLN yaitu $\pm 10\%$ atau minimum 198 volt dari nilai ideal 220 Volt.
2. SPLN 1995:1, “Tegangan-Tegangan Standar “, PT. PLN (PERSERO) Kebayoran Baru, Jakarta 1995..
3. SPLN 1993:56-1, “Sambungan Listrik Tegangan Rendah (SLTR)”. Jakarta : Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara.
4. Abdul Hamid, Budi Sukoco, Agus Adhi Nugroho, “Analisa drop tegangan sambungan rumah pada kabel tegangan rendah (SKTR) transformator 1 fasa di PT. PLN (Persero) UPJ Junawa,” in *Prosiding Konferensi Ilmiah Mahasiswa Unissula (KIMU) 2*, 2019, pp 495-502.

5. Penelitian yang dilakukan oleh I. M. A. Mahardiananta, P. A. R. Arimbawa, dan D. A. S. Santiari (2020) dengan judul *“Perhitungan Drop Tegangan Sistem Distribusi Menggunakan Metode Aliran Daya”* membahas analisis drop tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik dengan menggunakan metode aliran daya (*load flow analysis*). Dalam penelitian tersebut, metode aliran daya digunakan untuk mengetahui besarnya drop tegangan pada tiap bus dalam jaringan distribusi serta mengevaluasi apakah tegangan masih sesuai dengan standar yang berlaku. Hasil penelitian ini menunjukkan pentingnya perhitungan drop tegangan sebagai dasar evaluasi kualitas tegangan pada jaringan distribusi. Relevansinya dengan penelitian saya terletak pada fokus yang sama, yaitu menganalisis drop tegangan pada sistem distribusi. Perbedaannya adalah penelitian Mahardiananta dkk. menggunakan pendekatan perhitungan aliran daya, sedangkan penelitian saya menitikberatkan pada upaya perbaikan drop tegangan dengan metode penyisipan transformator distribusi. Dengan demikian, penelitian tersebut menjadi salah satu referensi penting karena memberikan dasar teori serta metode analisis yang mendukung perhitungan dan evaluasi drop tegangan pada jaringan distribusi di PLN ULP Ahmad Yani, PT PLN UP3 Banjarmasin.
6. Penelitian yang dilakukan oleh M. Mujiburrahman, J. Joko, B. Suprianto, dan U. T. Kartini (2021) berjudul *“Analisis Tegangan Jatuh (Drop Voltage) Pada Unit Boiler di PPSDM Migas Cepu Menggunakan ETAP 12.6.0”* membahas perhitungan dan simulasi tegangan jatuh pada sistem kelistrikan unit boiler dengan memanfaatkan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Analisis dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan jatuh yang terjadi pada jaringan listrik internal serta dampaknya terhadap kinerja peralatan. Hasil penelitian menunjukkan adanya titik-titik tertentu yang mengalami drop tegangan melebihi standar, sehingga diperlukan upaya perbaikan agar sistem tetap andal. Relevansi penelitian ini dengan penelitian saya terletak pada fokus yang sama, yaitu kajian mengenai drop tegangan pada sistem kelistrikan. Perbedaannya adalah penelitian Mujiburrahman dkk. menggunakan simulasi ETAP pada sistem kelistrikan industri (unit boiler), sedangkan penelitian saya lebih menekankan pada perbaikan drop tegangan di jaringan distribusi PLN melalui metode penyisipan transformator.

Dengan demikian, penelitian tersebut menjadi referensi penting dalam memberikan gambaran metode analisis drop tegangan menggunakan simulasi serta validasi teknis yang dapat mendukung penelitian saya di PLN ULP Ahmad Yani, PT PLN UP3 Banjarmasin.

7. Penelitian yang dilakukan oleh R. Sutjipto, H. Sungkowo, dan D. D. Kharisma (2023) dengan judul “Analisis Penggunaan Transformator Sisipan untuk Mengatasi Rugi Tegangan dan Pembebanan Lebih” membahas penerapan metode penyisipan transformator distribusi sebagai solusi teknis untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi beban berlebih pada jaringan distribusi. Penelitian ini menekankan bahwa penempatan trafo sisip pada titik strategis jaringan mampu memperpendek panjang saluran efektif, membagi beban lebih merata, serta menurunkan rugi-rugi daya yang terjadi. Hasil analisis menunjukkan adanya perbaikan signifikan pada tegangan di sisi pelanggan serta peningkatan efisiensi distribusi listrik setelah dilakukan penyisipan trafo. Relevansi penelitian ini dengan penelitian saya sangat kuat, karena sama-sama menitikberatkan pada perbaikan drop tegangan dengan metode penyisipan transformator. Bedanya, penelitian Sutjipto dkk. lebih fokus pada kombinasi aspek rugi tegangan dan pembebanan lebih, sedangkan penelitian saya berfokus pada analisis drop tegangan di jaringan distribusi PLN ULP Ahmad Yani di bawah koordinasi UP3 Banjarmasin. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi salah satu referensi utama yang mendukung metode yang saya gunakan.
8. Penelitian yang dilakukan oleh I. Roza, L. A. Siregar, dan A. A. Nasution (2020) dengan judul “Memperkecil Persentase Jatuh Tegangan pada Penyulang 20 kV Gardu Induk PT PLN (Persero)” membahas upaya perbaikan kualitas tegangan pada jaringan distribusi menengah 20 kV. Penelitian ini menganalisis penyebab terjadinya jatuh tegangan pada penyulang yang panjang dan padat beban, serta mengevaluasi alternatif teknis yang dapat dilakukan untuk mengurangi besarnya drop tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbaikan konfigurasi jaringan dan optimalisasi penempatan transformator dapat memperkecil persentase tegangan jatuh sehingga kualitas layanan tenaga listrik meningkat. Relevansi penelitian ini dengan penelitian saya cukup kuat, karena sama-sama menitikberatkan pada masalah drop tegangan pada jaringan distribusi

20 kV. Perbedaannya terletak pada metode yang digunakan, di mana penelitian Roza dkk. lebih menekankan pada pengaturan penyulang dan optimasi konfigurasi, sementara penelitian saya lebih fokus pada perbaikan drop tegangan dengan metode penyisipan transformator distribusi pada jaringan PLN ULP Ahmad Yani, PT PLN UP3 Banjarmasin. Dengan demikian, penelitian ini menjadi salah satu referensi penting yang mendukung analisis dan pembahasan dalam penelitian saya.

2.2 Tinjauan Pustaka

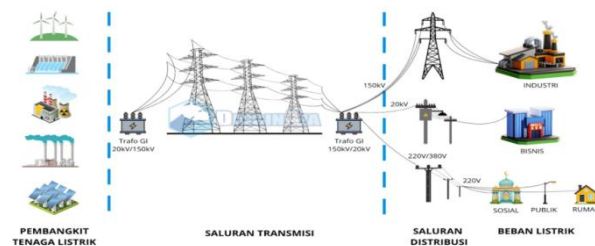
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu rangkaian yang terdiri dari tiga bagian utama yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi [6] . Proses ini dimulai dari pembangkit listrik yang menghasilkan energi, kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi, hingga akhirnya didistribusikan kepada pelanggan melalui jaringan distribusi. Distribusi listrik memegang peran penting karena menjadi tahap terakhir sebelum energi sampai ke konsumen. Pada tahap ini, kualitas tegangan dan kontinuitas penyaluran sangat berpengaruh terhadap kepuasan pelanggan. Salah satu permasalahan yang sering timbul dalam sistem distribusi adalah terjadinya drop tegangan yang disebabkan oleh panjang saluran, besarnya beban, serta bertambahnya jumlah pelanggan di suatu wilayah.[7]

Dalam pengelolaan dan pengaturan sistem distribusi, PT PLN (Persero) Unit Induk Pengatur Distribusi (UP2D) Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah berfungsi sebagai pusat kendali yang memastikan penyaluran tenaga listrik berjalan sesuai standar mutu dan kebutuhan beban. UP2D melakukan monitoring, pengaturan aliran daya, dan mengoordinasikan unit-unit pelayanan di bawahnya untuk menjaga keandalan distribusi listrik. Dan UP3 Banjarmasin Salah satu unit operasional yang berperan langsung di lapangan adalah Unit Layanan Pelanggan ULP Ahmad Yani, yang bertugas melaksanakan pelayanan teknis dan menangani gangguan maupun permasalahan tegangan. Dengan koordinasi antara UP3 Banjarmasin sebagai pelaksana pelayanan pelanggan dan ULP sebagai pelaksana operasional, penanganan drop tegangan dapat dilakukan lebih cepat dan terarah.

Upaya perbaikan drop tegangan pada jaringan distribusi dapat dilakukan dengan berbagai metode, salah satunya adalah penyisipan transformator distribusi. Prinsip

dari metode ini adalah memperpendek jarak penyaluran listrik agar tegangan yang diterima pelanggan tetap berada dalam batas toleransi standar. Dengan penyisipan trafo pada titik-titik strategis, beban dapat terbagi lebih merata sehingga profil tegangan di seluruh jaringan lebih stabil[8]. Hal ini tidak hanya meningkatkan kualitas daya yang diterima pelanggan, tetapi juga mengurangi rugi-rugi energi pada jaringan. Bagi ULP Ahmad Yani di bawah koordinasi UP3 Banjarmasin, metode ini menjadi salah satu solusi efektif dalam meningkatkan kualitas pelayanan tenaga listrik di wilayah kerjanya.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

2.2.2 Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik statis yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dengan cara mengubah tingkat tegangan dari satu taraf ke taraf lainnya melalui prinsip induksi elektromagnetik. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, transformator distribusi berperan penting untuk menurunkan tegangan menengah (umumnya 20 kV) menjadi tegangan rendah (400/230 V) yang digunakan oleh pelanggan. Keberadaan transformator sangat menentukan kualitas tegangan yang diterima pelanggan, karena kesalahan dalam kapasitas maupun penempatan dapat menyebabkan drop tegangan yang signifikan pada jaringan distribusi.[9]

Pada jaringan distribusi PLN, tegangan menengah standar yang digunakan adalah 20 kV. Transformator 20 kV biasanya dipasang di gardu distribusi maupun pada titik-titik tertentu sepanjang penyulang distribusi. Jenis transformator ini didesain untuk beroperasi secara terus-menerus dengan kemampuan menyalurkan daya sesuai rating yang ditentukan. Kapasitas transformator distribusi bervariasi, mulai dari 25 kVA hingga ratusan kVA, disesuaikan dengan kebutuhan beban di wilayah pelayanan. Penempatan transformator pada jaringan distribusi harus memperhatikan faktor teknis seperti panjang saluran, jumlah pelanggan, distribusi

beban, serta standar tegangan yang berlaku agar daya yang disalurkan tetap stabil.[10]

Dalam praktik di lapangan, metode penyisipan transformator 20 kV sering digunakan sebagai salah satu solusi untuk mengurangi drop tegangan[11]. Dengan menempatkan transformator tambahan di titik yang strategis, panjang saluran efektif yang dialiri arus dapat dipangkas, sehingga tegangan yang diterima pelanggan menjadi lebih stabil. Selain itu, penyisipan transformator juga membantu pembagian beban lebih merata antar penyulang atau antar gardu distribusi, sehingga mengurangi risiko kelebihan beban pada satu trafo. Bagi PLN ULP Ahmad Yani di bawah koordinasi UP3 Banjarmasin, strategi ini merupakan langkah penting dalam meningkatkan keandalan sistem distribusi sekaligus menjaga kualitas pelayanan tenaga listrik kepada pelanggan.



Gambar 2. 2 Penyisipan Transformator

(Dokumentasi : Pribadi, September 2025)

2.2.3 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan atau *voltage drop* adalah kondisi berkurangnya tegangan listrik dari sisi sumber menuju sisi beban akibat adanya hambatan dan reaktansi pada penghantar. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, arus yang mengalir melalui konduktor akan menimbulkan rugi-rugi tegangan, sehingga semakin jauh jarak pelanggan dari sumber listrik, semakin besar pula risiko terjadinya drop tegangan. Fenomena ini merupakan hal yang wajar terjadi, tetapi harus tetap dikendalikan agar tegangan yang diterima pelanggan sesuai dengan standar yang berlaku.[12]

Menurut PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) dan SPLN (Standar PLN), batas toleransi tegangan pada jaringan distribusi ditetapkan sekitar plus minus lima persen sampai dengan plus minus sepuluh persen dari tegangan nominal. Artinya,

untuk sistem distribusi menengah 20 kV, tegangan yang diterima pelanggan seharusnya berada dalam rentang sekitar 19 kV sampai 21 kV. Sementara pada sistem tegangan rendah 230 V, tegangan yang diterima pelanggan harus berada dalam kisaran sekitar 207 V sampai 241 V. Jika tegangan yang diterima pelanggan berada di bawah batas bawah (misalnya di bawah 19 kV untuk jaringan 20 kV, atau di bawah 198 V untuk jaringan 230 V), maka kualitas tegangan dianggap tidak memenuhi standar. Tegangan rendah dapat menurunkan kinerja peralatan listrik, menambah rugi-rugi energi, dan berpotensi merusak peralatan pelanggan.[13]

Dalam konteks operasional PLN, masalah drop tegangan umumnya terjadi pada jaringan distribusi yang panjang dan memiliki jumlah pelanggan yang besar. Salah satu metode teknis yang diterapkan untuk mengatasinya adalah penyisipan transformator distribusi. Dengan adanya trafo sisip di titik-titik strategis, panjang saluran efektif dapat dipangkas, arus terbagi lebih merata, dan tegangan di sisi pelanggan lebih stabil. Hal ini sejalan dengan upaya PLN ULP Ahmad Yani di bawah koordinasi UP3 Banjarmasin untuk meningkatkan kualitas pelayanan, menjaga mutu tegangan sesuai standar, serta meminimalisasi keluhan pelanggan akibat tegangan rendah.

2.2.4 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik peralihan dari jaringan distribusi menengah ke jaringan distribusi rendah. Di dalam gardu distribusi terdapat transformator distribusi yang berperan menurunkan tegangan menengah (umumnya 20 kV) menjadi tegangan rendah (400/230 V) yang siap disalurkan ke pelanggan. Selain transformator, gardu distribusi juga dilengkapi dengan peralatan proteksi, pengukuran, dan pengamanan untuk menjaga keandalan serta keselamatan penyaluran energi listrik. Dengan adanya gardu distribusi, beban dapat dibagi secara lebih merata sehingga penyaluran daya menjadi lebih efisien dan kualitas tegangan di sisi pelanggan tetap terjaga.

Dalam pengoperasiannya, gardu distribusi dapat berbentuk gardu portal, gardu beton, gardu kios, maupun gardu tiang tergantung pada kebutuhan teknis dan kondisi lingkungan. Pemilihan jenis gardu harus mempertimbangkan kapasitas daya yang disalurkan, tingkat kepadatan beban, serta aspek keamanan dan estetika lingkungan. Penempatan gardu distribusi juga harus strategis agar dapat menjangkau beban secara efektif, memperpendek panjang saluran, dan mengurangi potensi drop tegangan yang

berlebihan. Dengan demikian, gardu distribusi tidak hanya berfungsi sebagai peralatan teknis, tetapi juga sebagai titik kunci dalam menjaga efisiensi dan keandalan distribusi tenaga listrik.[14]

Dalam konteks operasional PLN, keberadaan gardu distribusi menjadi sangat penting terutama di wilayah kerja yang padat pelanggan seperti ULP Ahmad Yani di bawah koordinasi UP3 Banjarmasin. Melalui perencanaan dan penataan gardu distribusi yang tepat, PLN dapat mengoptimalkan pelayanan kepada pelanggan dengan kualitas tegangan yang stabil dan andal. Selain itu, strategi teknis seperti penyisipan transformator distribusi pada gardu yang ada maupun pembangunan gardu baru merupakan langkah nyata dalam mengatasi masalah drop tegangan. Hal ini sejalan dengan tujuan PLN untuk meningkatkan kualitas pelayanan tenaga listrik, menurunkan tingkat gangguan, dan menjaga kepuasan pelanggan.

2.2.5 Jenis jenis Gardu Distribusi

a. Gardu Cantol

Gardu Cantol merupakan gardu distribusi yang dipasang pada tiang beton atau tiang besi di sepanjang jaringan distribusi menengah. Biasanya gardu ini menggunakan transformator dengan kapasitas relatif kecil, mulai dari 25 kVA hingga 200 kVA, sehingga cocok digunakan untuk melayani daerah dengan jumlah pelanggan yang tidak terlalu padat, seperti perdesaan atau kawasan pinggiran kota. Keunggulan gardu tiang adalah biaya pembangunan yang relatif murah, proses pemasangan cepat, dan tidak memerlukan lahan khusus. Namun kelemahannya, peralatan gardu ini umumnya terbuka sehingga lebih rentan terhadap gangguan lingkungan, cuaca, maupun tindakan vandalisme.



Gambar 2. 3 Gardu Distribusi Cantol

b. Gardu Portal

Gardu portal dibangun dengan konstruksi rangka baja atau beton yang berdiri di atas tanah. Kapasitas transformator yang dipasang pada gardu ini lebih besar dibanding gardu tiang, umumnya berkisar antara 100 kVA hingga 630 kVA. Gardu portal dilengkapi dengan peralatan proteksi, pemutus beban, serta sistem pengukuran yang lebih lengkap. Gardu jenis ini biasanya digunakan untuk melayani kawasan industri, perumahan besar, maupun pusat kota dengan kebutuhan daya yang cukup tinggi. Dibandingkan gardu tiang, gardu portal lebih terlindungi dan lebih andal, meskipun membutuhkan lahan yang lebih luas dan biaya pembangunan yang lebih tinggi.



Gambar 2. 4 Gardu Distribusi Portal

c. Gardu Beton

Gardu beton merupakan gardu distribusi permanen yang dibangun menggunakan konstruksi beton bertulang. Gardu ini memiliki ruang khusus untuk menempatkan transformator distribusi, peralatan proteksi, dan panel distribusi sehingga lebih aman dan terlindungi dari gangguan luar. Kapasitas gardu beton umumnya menengah hingga besar, mulai dari 250 kVA sampai lebih dari 1.000 kVA, sehingga cocok digunakan di kawasan padat pelanggan, pusat bisnis, atau kawasan industri. Kelebihan gardu beton adalah keamanannya yang tinggi, keandalan lebih baik, serta penampilan yang lebih rapi. Namun, pembangunan gardu ini membutuhkan biaya yang lebih besar serta waktu konstruksi yang lebih lama dibanding jenis gardu lainnya.



Gambar 2. 5 Gardu Distribusi Beton

d. Gardu Kios (Compact Substation)

Gardu kios atau *compact substation* adalah jenis gardu distribusi yang berbentuk menyerupai kios atau kontainer tertutup, di mana seluruh peralatan seperti transformator, panel distribusi, dan proteksi ditempatkan dalam satu unit yang kompak. Kapasitas trafo pada gardu kios bervariasi, mulai dari 160 kVA hingga 1.000 kVA, sehingga fleksibel untuk berbagai kebutuhan. Gardu kios sangat cocok dipasang di kawasan perkotaan dengan lahan terbatas, karena desainnya ringkas, aman, dan memiliki tampilan yang estetik. Selain itu, gardu kios dapat dibuat portable sehingga mudah dipindahkan sesuai kebutuhan. Kekurangannya adalah biaya investasi yang relatif lebih mahal dibanding gardu tiang atau gardu portal.



Gambar 2. 6 Gardu Distribusi Kios

2.2.6 Metode - Metode Perbaikan Drop Tegangan

Permasalahan drop tegangan pada jaringan distribusi dapat ditangani melalui berbagai pendekatan teknis yang bertujuan memperbaiki nilai tegangan di sisi pelanggan. Upaya ini dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan yang diterima pelanggan tetap berada dalam batas toleransi yang ditetapkan oleh SPLN dan PUIL.

Dalam praktik operasional PLN, pilihan metode perbaikan harus mempertimbangkan kondisi jaringan, jarak beban dari sumber, kapasitas konduktor, serta karakteristik pertumbuhan beban di wilayah tersebut. Oleh karena itu, perbaikan drop tegangan tidak dapat dilakukan dengan satu solusi tunggal, melainkan harus dipilih berdasarkan efektivitas teknis, efisiensi biaya, dan kemudahan implementasi di lapangan.

Beragam metode teknis yang dapat diterapkan di antaranya adalah penyisipan transformator distribusi, penggantian konduktor dengan ukuran yang lebih besar, pengalihan beban antar penyulang, pembangunan gardu baru, hingga optimalisasi tegangan melalui pengaturan tap changer. Setiap metode memiliki karakteristik, keunggulan, serta batasan masing-masing. Pada jaringan yang panjang dan beban padat, misalnya, penyisipan transformator menjadi solusi efektif untuk memperpendek jalur penyaluran tegangan rendah. Dengan memahami berbagai metode ini, analisis perbaikan drop tegangan dapat dilakukan secara lebih terarah dan sesuai kebutuhan jaringan distribusi di ULP Ahmad Yani.

a. Penyisipan Transformator (Gardu Sisip)

Penyisipan transformator atau pembangunan gardu sisip merupakan metode yang paling sering digunakan untuk mengatasi drop tegangan pada jaringan yang panjang dan padat beban. Dengan menempatkan transformator tambahan pada titik strategis, panjang jalur penyaluran di sisi tegangan rendah dapat dipangkas sehingga tegangan yang diterima pelanggan menjadi lebih stabil. Cara ini juga membantu membagi beban lebih merata antar transformator, sehingga arus pada saluran primer menurun dan rugi-rugi tegangan dapat ditekan. Metode ini tergolong cepat, efektif, dan relatif ekonomis dibandingkan penggantian seluruh konduktor jaringan.

b. Penggantian Konduktor dengan Ukuran Lebih Besar

Metode ini dilakukan dengan mengganti kabel atau penghantar yang sudah tidak mampu menampung arus beban karena ukurannya terlalu kecil. Konduktor dengan penampang lebih besar memiliki resistansi lebih rendah sehingga drop tegangan sepanjang saluran menjadi lebih kecil. Meskipun sangat efektif secara teknis, penggantian konduktor membutuhkan biaya dan waktu pelaksanaan yang cukup besar, terutama pada jaringan distribusi yang panjang. Oleh sebab itu, metode ini umumnya digunakan pada penyulang yang sudah mengalami pertumbuhan beban signifikan dan dinilai tidak ekonomis untuk dilakukan penyisipan trafo.

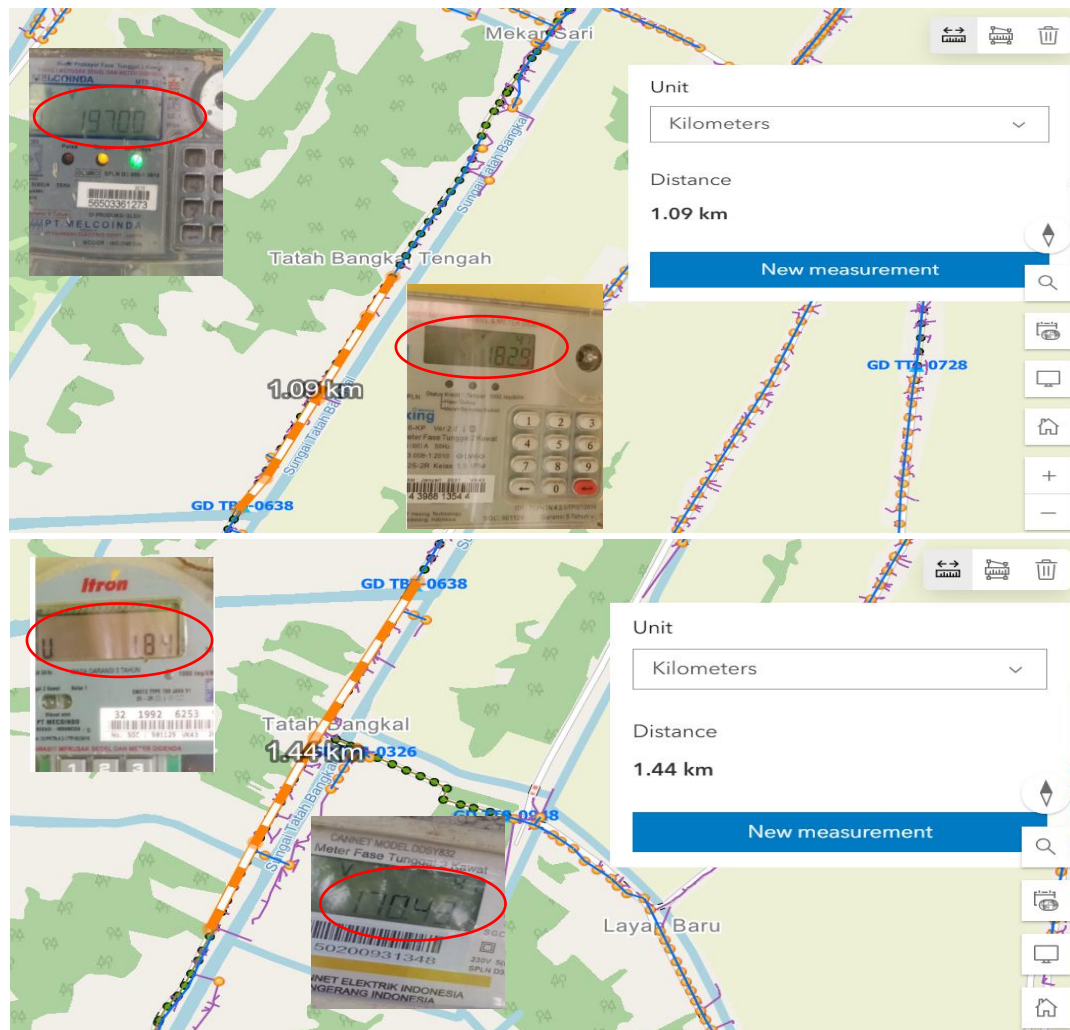
c. Pindah Beban

Pindah beban jaringan saluran rendah atau pengalihan beban dilakukan dengan memindahkan sebagian beban sebagian ke sumber beban lain yang masih memiliki kapasitas. Metode ini tidak mengubah struktur fisik jaringan, tetapi mengoptimalkan pemakaian kapasitas trafo agar aliran arus lebih seimbang. Dengan berkurangnya arus pada beban trafo yang sebelumnya terlalu penuh, rugi tegangan dapat menurun. Pindah beban efektif untuk kondisi jaringan udara rendah yang panjang dan beban besar untuk di pindah beban sebagian ke beban jaringan yang ringan dan berdekatan dan masih bisa menampung beban dari sumber beban lain. Kelemahannya, metode ini hanya bersifat sementara dan tidak dapat mengatasi drop tegangan pada penyulang yang memang terlalu panjang.

Pada jaringan tegangan rendah (JTR), drop tegangan sangat mudah terjadi karena saluran yang panjang dan beban yang semakin meningkat dari tahun ke tahun. Pelanggan yang posisinya jauh dari gardu distribusi mengalami penurunan tegangan paling signifikan, bahkan sering hanya menerima 190–200 V, jauh di bawah batas minimum standar PUIL yaitu 207 V. Jika tetap mengandalkan suplai dari gardu eksisting tanpa penambahan trafo baru, tegangan JTR sulit diperbaiki karena sifatnya yang sangat dipengaruhi panjang saluran dan rugi-rugi arus. Penyisipan transformator menjadi solusi paling tepat karena metode ini langsung memperpendek jalur JTR, menempatkan sumber tegangan baru yang lebih dekat dengan pelanggan, dan secara otomatis menaikkan tegangan yang jatuh sepanjang konduktor.

Dibanding metode lain seperti penggantian konduktor, pengalihan beban, metode penyisipan trafo jauh lebih efektif pada kasus drop tegangan di JTR. Penggantian konduktor membutuhkan biaya besar dan tidak mengurangi panjang saluran. Pengalihan beban tidak menyelesaikan masalah apabila seluruh jaringan sudah mendekati kapasitas. Dengan gardu sisip, tegangan rendah dapat langsung diperbaiki karena saluran yang sebelumnya panjang dibagi menjadi dua seksi yang lebih pendek. Selain itu, metode ini cepat diterapkan, tidak mengganggu pelayanan pelanggan, dan memberikan hasil perbaikan tegangan yang signifikan, sehingga menjadi pilihan yang paling realistis dan efisien untuk perbaikan drop tegangan pada JTR di wilayah ULP Ahmad Yani.

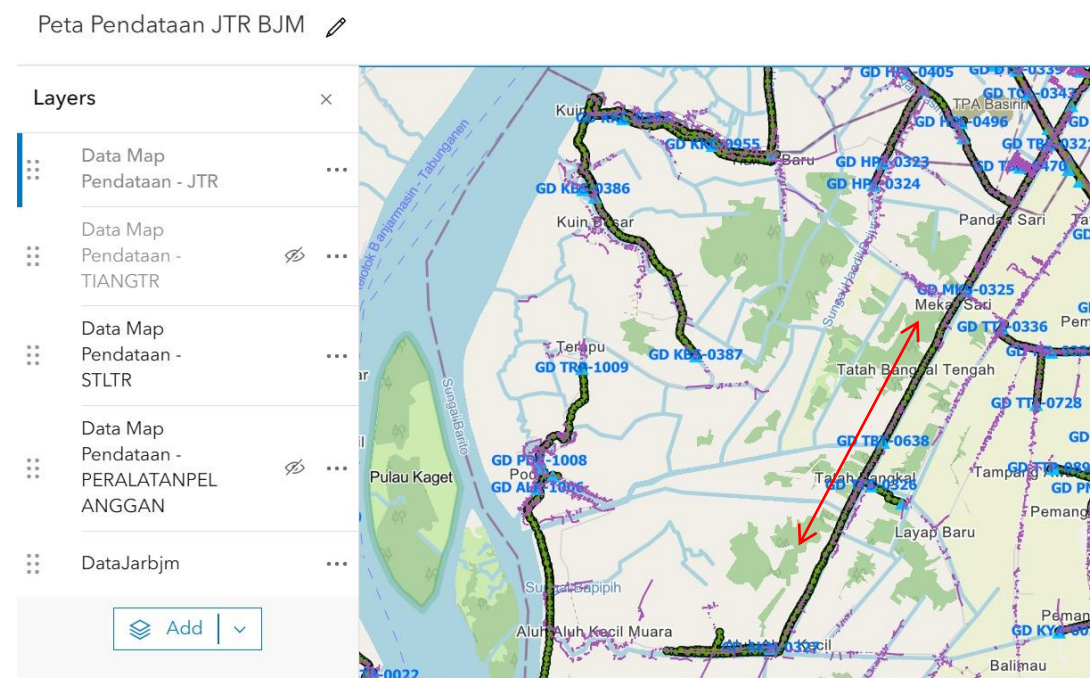
2.2.7 Jaringan Tegangan Rendah dan Pengaruh Panjang Saluran terhadap Drop Tegangan



Gambar 2. 7 Data Teknis JTR

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) merupakan bagian akhir dari sistem distribusi listrik yang menyalurkan energi dari transformator distribusi menuju pelanggan langsung. JTR umumnya menggunakan konduktor berbahan aluminium seperti tipe NFA2X-T, yang dirancang untuk menyalurkan daya dengan aman pada tegangan 220/380 V. Namun, karakteristik konduktor yang memiliki resistansi lebih tinggi dibandingkan tembaga membuat aliran arus pada jarak panjang menimbulkan rugi-rugi listrik yang cukup signifikan. Ketika arus mengalir melalui penghantar dengan impedansi tertentu, sebagian tegangan akan hilang di sepanjang saluran, sehingga mengurangi tegangan yang diterima pelanggan terutama pada titik paling jauh dari gardu distribusi.

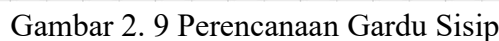
Panjang saluran merupakan faktor paling dominan yang menyebabkan terjadinya drop tegangan pada JTR. Semakin panjang jaringan, semakin besar total resistansi dan reaktansi yang dilalui arus, sehingga rugi tegangan ($V_{\text{drop}} = I \times Z$) meningkat. Kondisi ini terlihat jelas pada lokasi penelitian, di mana panjang JTR dengan ukuran 3x5mm Jurusan A 1.93 km, dan jurusan B mencapai 2.30 km, menyebabkan tegangan di pelanggan ujung jaringan turun hingga 170–182 V, jauh di bawah standar minimum PUIL 198 V. Tegangan baru dapat kembali normal setelah penyisipan transformator yang memperpendek panjang jalur tegangan rendah menjadi dua segmen yang lebih pendek. Hal ini menunjukkan bahwa panjang saluran memiliki hubungan langsung dan signifikan terhadap besarnya drop tegangan yang terjadi pada JTR.



Gambar 2. 8 Argis Peta Jalur JTR

2.2.8 Penyisipan Transformator sebagai Metode Perbaikan Drop Tegangan

Penyisipan transformator atau gardu sisip merupakan salah satu metode paling efektif dalam mengatasi permasalahan drop tegangan pada jaringan distribusi, khususnya pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) yang memiliki panjang saluran melebihi batas ideal. Dengan menempatkan transformator baru pada titik yang telah diperhitungkan, aliran energi listrik dibagi ke segmen yang lebih pendek sehingga impedansi total pada saluran berkurang secara signifikan. Pengurangan panjang jalur tegangan rendah inilah yang membuat tegangan di sisi pelanggan meningkat dan kembali sesuai standar. Metode ini sangat cocok diterapkan pada jaringan yang



dikurangi sehingga distribusi daya menjadi lebih merata dan stabil. Penerapan gardu sisip juga memberikan hasil yang cepat terlihat, sebagaimana peningkatan tegangan yang sebelumnya hanya 170–182 V menjadi 215–213 V pada tegangan ujnng jaringan rendahh setelah penyisipan transformator baru. Hal ini menjadikan metode gardu sisip sebagai pilihan paling tepat dan efisien untuk memperbaiki kualitas tegangan di jaringan distribusi.

Dibandingkan metode lain seperti penggantian konduktor atau pengalihan beban, penyisipan transformator memiliki keunggulan dari sisi teknis, biaya, dan waktu pelaksanaan. Pada jaringan jurusan A dan B dengan panjang JTR seperti lokasi penelitian jurusan A mencapai 1.93 km untuk jurusan A dan 2.30 km untuk jurusan B, gardu sisip mampu menurunkan rugi tegangan secara langsung tanpa perlu melakukan rekonstruksi jaringan besar-besaran. Selain itu, beban pada transformator lama dapat dikurangi sehingga distribusi daya menjadi lebih merata dan stabil. Penerapan gardu sisip juga memberikan hasil yang cepat terlihat, sebagaimana peningkatan tegangan yang sebelumnya hanya 170–182 V menjadi 215–213 V pada tegangan ujnng jaringan rendahh setelah penyisipan transformator baru. Hal ini menjadikan metode gardu sisip sebagai pilihan paling tepat dan efisien untuk memperbaiki kualitas tegangan di jaringan distribusi.

2.2.9 Standar Tegangan dan Mutu Pelayanan Tenaga Listrik

Kondisi Tegangan	Batas (%)	Tegangan (V)	Keterangan
Maksimum	+5%	231 V	Masih memenuhi SPLN
Nominal	0%	220 V	Tegangan standar
Minimum	–10%	198 V	Batas bawah SPLN

Gambar 2.10 Standar Mutu tegangan SPLN 1:1978

Mutu pelayanan tenaga listrik merupakan salah satu indikator utama kualitas sistem distribusi yang secara langsung dirasakan oleh pelanggan. Salah satu parameter terpenting dalam mutu pelayanan adalah kestabilan dan kesesuaian tegangan yang diterima pelanggan terhadap standar yang telah ditetapkan. Tegangan yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menurunkan kinerja peralatan listrik, mempercepat kerusakan peralatan, serta menurunkan tingkat kepuasan pelanggan.

Di Indonesia, standar mutu tegangan diatur dalam beberapa regulasi teknis, antara lain Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) dan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN 1:1978). Menurut PUIL, untuk sistem tegangan rendah dengan tegangan nominal 220 V, batas toleransi tegangan yang diperbolehkan berada pada rentang +5% hingga -10%. Dengan demikian, tegangan minimum yang diperkenankan adalah sebesar 198 V dan tegangan maksimum sebesar 231 V.

Standar SPLN juga menetapkan bahwa persentase jatuh tegangan maksimum yang diperbolehkan pada jaringan distribusi adalah sebesar 10% dari tegangan nominal. Apabila tegangan yang diterima pelanggan berada di luar rentang tersebut, maka kualitas pelayanan tenaga listrik dinyatakan tidak memenuhi standar mutu. Kondisi ini mengharuskan pihak penyedia tenaga listrik melakukan tindakan perbaikan jaringan untuk mengembalikan mutu tegangan sesuai ketentuan.

Tegangan rendah yang berlangsung dalam jangka waktu lama dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, antara lain meningkatnya arus pada beban motor, terjadinya pemanasan berlebih pada peralatan, menurunnya efisiensi peralatan listrik, serta meningkatnya risiko kerusakan. Pada peralatan rumah tangga seperti kulkas, pompa air, dan pendingin udara, tegangan rendah dapat menyebabkan motor bekerja tidak optimal dan memperpendek umur pakai peralatan.

Dari sisi penyedia tenaga listrik, mutu tegangan yang tidak memenuhi standar akan meningkatkan jumlah keluhan pelanggan serta menurunkan citra pelayanan perusahaan. Oleh karena itu, pemantauan profil tegangan secara berkala dan pelaksanaan tindakan perbaikan jaringan menjadi bagian penting dalam pengelolaan sistem distribusi tenaga listrik.

Dalam konteks penelitian ini, standar mutu tegangan digunakan sebagai acuan utama dalam mengevaluasi kondisi jaringan sebelum dan sesudah dilakukan penyisipan transformator. Perbaikan jaringan dinyatakan berhasil apabila seluruh nilai tegangan hasil pengukuran berada dalam rentang standar PUIL dan persentase drop tegangan berada di bawah batas toleransi SPLN.

2.2.10 Penyisipan Transformator Distribusi

Penyisipan transformator distribusi merupakan salah satu metode perbaikan jaringan yang dilakukan dengan menambahkan transformator baru di tengah jaringan yang memiliki panjang saluran berlebihan. Tujuan utama metode ini adalah

memperpendek jarak penyaluran tenaga listrik sehingga impedansi total saluran menurun dan rugi tegangan dapat ditekan.

Pada kondisi jaringan dengan panjang saluran yang terlalu besar, tegangan pada ujung jaringan akan turun secara signifikan akibat akumulasi rugi-rugi resistif dan reaktif. Dengan menempatkan transformator sisip di lokasi strategis, jaringan dibagi menjadi beberapa segmen yang lebih pendek sehingga tegangan pada setiap segmen dapat dipertahankan mendekati nilai nominal.

Secara prinsip, penyisipan transformator memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

1. Memperpendek panjang jaringan efektif
2. Mengurangi impedansi total saluran
3. Menurunkan arus pada masing-masing segmen jaringan
4. Menurunkan rugi daya dan rugi tegangan
5. Meningkatkan keandalan sistem distribusi

Metode ini banyak diterapkan pada jaringan distribusi pedesaan dan wilayah dengan pertumbuhan beban yang pesat, karena relatif mudah dilaksanakan dan tidak memerlukan perubahan besar pada konfigurasi jaringan utama.