



Inventarisasi Spasial Infrastruktur Jaringan Listrik untuk Optimalisasi Pelayanan Kelistrikan di Musi Rawas

Achmad Asril Asri^{1*}, Oknovia Susanti²

¹ Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur, Sekolah Pascasarjana, Universitas Andalas, Indonesia

² Program Studi Teknik Mesin, Universitas Andalas, Indonesia

Email: asrilasri@yahoo.com^{1*}, oknovia.s@eng.unand.ac.id²

*Penulis Korespondensi: asrilasri@yahoo.com

Abstract. Electricity service quality depends not only on physical network expansion but also on the availability of accurate, traceable, and spatially integrated asset data. This study aims to formulate an infrastructure inventory plan for electricity distribution networks as a basis for optimizing electricity services in Musi Rawas Regency, Indonesia. A descriptive-technical approach was applied using administrative maps, spatial planning documents, distribution network maps, feeder single-line diagrams, January 2026 customer data, bill of quantity documents for electricity and public street lighting, and the planned network drawing for Mandi Aur Village. The results show that 14 target districts served approximately 101,932 customers, consisting of 78,564 postpaid and 23,368 prepaid customers. Tugumulyo, Megang Sakti, Muara Kelingi, and Muara Lakitan represented the largest customer concentrations and should be prioritized for detailed asset verification. The proposed inventory object includes medium-voltage lines, low-voltage lines, poles, distribution transformers, protection equipment, public street lighting, panels, and operation-worthiness documents. The inventory database should include unique asset codes, coordinates, feeder identity, specifications, physical condition, photographs, operational status, and follow-up actions. Spatial inventory is expected to improve maintenance planning, outage response, public lighting management, safety control, and evidence-based network development.

Keywords: Asset Inventory; Electricity Distribution; Electricity Service; GIS; Spatial Database.

Abstrak. Mutu pelayanan kelistrikan tidak hanya ditentukan oleh perluasan fisik jaringan, tetapi juga oleh ketersediaan data aset yang akurat, telusur, mutakhir, dan terintegrasi secara spasial. Penelitian ini bertujuan menyusun perencanaan inventarisasi infrastruktur jaringan listrik sebagai dasar optimalisasi pelayanan kelistrikan di Kabupaten Musi Rawas. Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif-teknis berbasis telaah peta administrasi, rencana struktur ruang, peta jaringan listrik, single line diagram penyulang, data pelanggan Januari 2026, BOQ jaringan listrik, BOQ LPJU, serta gambar rencana jaringan Desa Mandi Aur. Hasil kajian menunjukkan bahwa 14 kecamatan sasaran memiliki sekitar 101.932 pelanggan listrik, terdiri atas 78.564 pelanggan pascabayar dan 23.368 pelanggan prabayar. Kecamatan Tugumulyo, Megang Sakti, Muara Kelingi, dan Muara Lakitan menjadi wilayah prioritas awal karena memiliki konsentrasi pelanggan terbesar. Objek inventarisasi yang direkomendasikan meliputi SUTM, SUTR, tiang, gardu/trafo distribusi, peralatan proteksi, LPJU, panel, dan dokumen kelaikan operasi. Database aset perlu memuat kode unik, koordinat, identitas penyulang, spesifikasi, kondisi fisik, foto, status operasi, dan tindak lanjut. Inventarisasi spasial berpotensi memperkuat pemeliharaan, penanganan gangguan, pengelolaan LPJU, keselamatan ketenagalistrikan, dan pengambilan keputusan berbasis data.

Kata kunci: Basis Data Spasial; Inventarisasi Aset; Jaringan Distribusi; Pelayanan Kelistrikan; SIG

1. LATAR BELAKANG

Energi listrik merupakan infrastruktur dasar yang berperan langsung dalam mendukung aktivitas rumah tangga, pendidikan, kesehatan, perdagangan, industri kecil, pemerintahan, keamanan wilayah, dan pelayanan publik. Dalam pengelolaan utilitas modern, ketenagalistrikan tidak hanya dipandang sebagai penyediaan energi, tetapi juga sebagai sistem pelayanan yang harus menjamin keselamatan, keandalan, efisiensi, keberlanjutan, dan kepastian operasi (Alquraiddi & Awad, 2024). Kinerja layanan tersebut sangat bergantung pada

Naskah Masuk: 20 April 2026; Revisi: 20 Mei 2026; Diterima: 12 Juni 2026; Terbit: 30 Juni 2026

kemampuan organisasi mengelola aset fisik sepanjang siklus hidupnya, mulai dari perencanaan, konstruksi, operasi, inspeksi, pemeliharaan, penggantian, sampai penghapusan aset (Dashti & Rouhandeh, 2023). Oleh karena itu, pengelolaan infrastruktur listrik memerlukan data aset yang lengkap, akurat, mutakhir, dan mudah ditelusuri agar keputusan teknis tidak hanya berdasarkan laporan parsial, tetapi berbasis bukti lapangan dan risiko layanan (Joobeni *et al.*, 2026).

Kabupaten Musi Rawas memiliki wilayah pelayanan yang luas, sebaran kecamatan yang beragam, pusat permukiman yang berkembang, kawasan pertanian, fasilitas umum, dan pusat kegiatan lokal. Karakter wilayah seperti ini menyebabkan pelayanan kelistrikan sangat bergantung pada ketersediaan jaringan distribusi yang andal dan terdokumentasi. Jaringan distribusi merupakan bagian sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan, sehingga kualitas data tentang tiang, SUTM, SUTR, gardu, trafo, panel, peralatan proteksi, dan LPJU menjadi dasar penting dalam menjaga mutu pelayanan akhir (Jiang *et al.*, 2025). Pada wilayah dengan sebaran permukiman yang melebar, data spasial diperlukan untuk membaca hubungan antara rute jaringan, pusat beban, akses jalan, kepadatan pelanggan, dan titik layanan publik (McGarry *et al.*, 2023). Pemodelan jaringan distribusi berbasis perangkat terbuka juga menunjukkan bahwa integrasi informasi jaringan dan lokasi dapat memperkuat analisis teknis layanan (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024).

Dalam praktik pengelolaan jaringan, persoalan yang sering muncul adalah keterpisahan antara data tabel, gambar rencana, BOQ, peta manual, single line diagram, dokumen Sertifikat Laik Operasi (SLO), dan catatan lapangan. Data yang tidak terintegrasi menyebabkan pengambilan keputusan teknis cenderung reaktif, terutama ketika terjadi gangguan, kebutuhan pemeliharaan, usulan perluasan jaringan, atau penggantian aset. Prinsip manajemen aset menekankan bahwa informasi aset harus konsisten, telusur, terstandar, dan mampu mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko sepanjang siklus hidup aset (Alquraiddi & Awad, 2024). Ketika identitas aset tidak unik, koordinat tidak tersedia, atau kondisi aset tidak diperbarui, organisasi akan mengalami kesulitan menyusun prioritas inspeksi, mengendalikan risiko keselamatan, dan menilai kebutuhan investasi secara tepat (Rajora *et al.*, 2024). Kebutuhan tersebut semakin kuat karena perencanaan pemeliharaan distribusi memerlukan data kondisi aset dan alokasi sumber daya yang dapat diperbarui secara berkala (Taghitahoonneh *et al.*, 2026).

Data pelanggan listrik Januari 2026 menunjukkan bahwa 14 kecamatan sasaran memiliki sekitar 101.932 pelanggan listrik, terdiri atas 78.564 pelanggan pascabayar dan 23.368 pelanggan Prabayar. Besarnya jumlah pelanggan tersebut menunjukkan bahwa inventarisasi jaringan tidak dapat dilakukan secara parsial dan sporadis. Inventarisasi harus dirancang sebagai proses teknis yang memiliki standar objek, standar atribut, standar pengambilan koordinat, standar dokumentasi foto, standar verifikasi dokumen, serta mekanisme validasi agar data dapat digunakan untuk pemeliharaan, penanganan gangguan, penguatan jaringan, perluasan layanan, dan evaluasi keandalan (Mortensen *et al.*, 2024). Keterkaitan antara data aset, data pelanggan, dan data gangguan menjadi penting karena gangguan pada aset tertentu dapat berdampak pada kelompok pelanggan yang berbeda-beda sesuai konfigurasi jaringan dan kepadatan beban (Malek *et al.*, 2023). Informasi nilai aset dan riwayat kegagalan juga dapat membantu menentukan prioritas investasi distribusi secara lebih rasional (Hedayati *et al.*, 2024).

Pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG) menjadi relevan karena mampu menggabungkan data spasial dan data atribut dalam satu platform analisis (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024). Melalui SIG, posisi tiang, gardu, jaringan, trafo, panel, LPJU, dan titik pelayanan dapat ditampilkan bersama informasi kondisi aset, identitas penyulang, status operasi, foto lapangan, histori pemeliharaan, dan dokumen kelaikan. Pada jaringan tegangan rendah, pemodelan berbasis informasi geospasial dapat membantu membaca lokasi beban, struktur jaringan, dan potensi perbaikan mutu daya (Antic & Capuder, 2024). Pendekatan geospasial yang skalabel juga berguna untuk melokalisasi jaringan distribusi dan menilai dampak teknologi rendah karbon pada wilayah pelayanan (McGarry *et al.*, 2023). Sistem GIS distribusi berbasis web bahkan dapat dikembangkan hingga mendukung evaluasi topologi jaringan, koordinasi proteksi, dan pengambilan keputusan operasional yang lebih efektif (Jiang *et al.*, 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menyusun artikel jurnal dari laporan teknis keinsinyuran mengenai perencanaan inventarisasi infrastruktur jaringan listrik di Kabupaten Musi Rawas. Kebaruan artikel ini terletak pada penggabungan data pelanggan, peta jaringan, single line diagram, BOQ jaringan, BOQ LPJU, dan rancangan database aset menjadi kerangka inventarisasi spasial yang dapat digunakan sebagai dasar optimalisasi pelayanan kelistrikan. Kerangka ini sejalan dengan agenda digitalisasi jaringan distribusi yang menekankan kesiapan data aset, operasi, pemeliharaan, dan interoperabilitas sejak tahap awal (Aghahadi *et al.*, 2024). Digitalisasi juga memerlukan pemahaman atas hambatan kebijakan,

tata kelola, dan prioritas investasi agar sistem yang dibangun tidak berhenti sebagai proyek teknologi semata (Monaco *et al.*, 2024). Pada tahap lanjut, database spasial yang konsisten dapat menjadi prasyarat bagi dashboard prediktif dan digital twin sistem energi cerdas (Aghazadeh Ardebili *et al.*, 2024). Integrasi digital twin pada smart grid juga menuntut perhatian terhadap keberlanjutan, keamanan, dan efisiensi sistem (Alharbey *et al.*, 2024).

2. KAJIAN TEORITIS

Infrastruktur ketenagalistrikan merupakan sistem pelayanan dasar yang terdiri atas komponen fisik, peralatan kontrol, prosedur operasi, dokumen keselamatan, data pelanggan, dan sumber daya manusia. Pada tingkat distribusi, gangguan pada satu komponen dapat berdampak terhadap banyak pelanggan, sehingga pengelolaan aset harus memperhatikan hubungan antara lokasi, fungsi, kondisi, umur aset, dan risiko layanan (Alquraiddi & Awad, 2024). Kajian ketahanan sistem tenaga menunjukkan bahwa jaringan distribusi membutuhkan perencanaan yang tidak hanya berorientasi pada penambahan kapasitas, tetapi juga pada kemampuan sistem mempertahankan layanan dan mempercepat pemulihan ketika terjadi gangguan (Paul *et al.*, 2024). Perspektif ketahanan infrastruktur juga menempatkan koordinasi teknis, kesiapan data, dan strategi pemulihan sebagai bagian penting dalam menjaga keberlanjutan layanan energi (Mohanty *et al.*, 2024).

Jaringan distribusi tenaga listrik umumnya terdiri atas jaringan tegangan menengah, gardu distribusi, jaringan tegangan rendah, sambungan pelayanan, peralatan proteksi, dan perangkat pengendali. Panjang penyulang, konfigurasi jaringan, titik percabangan, kapasitas gardu, karakteristik beban, kondisi peralatan, dan ketersediaan data topologi akan memengaruhi rugi-rugi, profil tegangan, koordinasi proteksi, serta mutu pelayanan (Dashti & Rouhandeh, 2023). Karena itu, inventarisasi tidak cukup hanya mencatat jumlah aset, tetapi harus menghubungkan setiap aset dengan fungsinya dalam sistem distribusi dan hubungannya dengan pelanggan yang dilayani. Integrasi data topologi dan simulasi jaringan dapat memperjelas hubungan antara konfigurasi jaringan, penetrasi sumber daya energi, dan kinerja operasi distribusi (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024). Pada aspek proteksi, data jaringan yang tepat juga diperlukan agar koordinasi peralatan proteksi adaptif dapat dievaluasi secara akurat (Zhan *et al.*, 2023). Sistem GIS berbasis web memperkuat kebutuhan tersebut karena data aset dapat dihubungkan dengan fungsi koordinasi proteksi dan pemetaan jaringan (Jiang *et al.*, 2025).

Inventarisasi aset merupakan proses pencatatan sistematis terhadap identitas, lokasi, kondisi, spesifikasi, status operasi, foto, riwayat pemeliharaan, status dokumen, dan tindak lanjut aset. Dalam kerangka manajemen aset, data yang baik memungkinkan organisasi mengelola nilai, risiko, biaya, dan kinerja aset secara berkelanjutan (Alquraiddi & Awad, 2024). Prinsip satu aset satu identitas menjadi penting untuk mencegah duplikasi, memudahkan pelacakan, menjaga hubungan antara data lapangan dan dokumen teknis, serta memperkuat akuntabilitas ketika aset berpindah status dari rencana, terpasang, diuji, beroperasi, diperbaiki, hingga diganti (Rajora *et al.*, 2024). Dalam konteks distribusi perkotaan, kerangka manajemen aset juga perlu mempertimbangkan keberlanjutan ekonomi, stabilitas layanan, dan prioritas investasi jangka panjang (Joobeni *et al.*, 2026). Perencanaan pemeliharaan berbasis kondisi aset dapat diperkuat melalui model alokasi sumber daya yang mempertimbangkan probabilitas kegagalan dan dampaknya terhadap layanan (Taghitahooneh *et al.*, 2026).

SIG dan mobile mapping dapat mempercepat proses inventarisasi karena petugas dapat mencatat titik koordinat, foto, status aset, dan catatan kerusakan secara langsung di lapangan. Data spasial memungkinkan pengelompokan aset berdasarkan kecamatan, desa, penyulang, gardu, rute jaringan, titik pelayanan, dan kedekatan dengan fasilitas umum (McGarry *et al.*, 2023). Pada jaringan tegangan rendah, pemodelan berbasis GIS membantu visualisasi topologi dan lokasi beban sehingga hasil inventarisasi dapat digunakan untuk analisis teknis berikutnya (Antic & Capuder, 2024). Integrasi QGIS dan perangkat simulasi distribusi menunjukkan bahwa data spasial dapat dihubungkan dengan model operasi jaringan secara lebih terbuka (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024). Dengan demikian, inventarisasi berubah dari kegiatan administratif menjadi alat perencanaan teknis yang mendukung prioritas pemeliharaan, evaluasi perluasan jaringan, identifikasi titik kritis, serta pengembangan sistem informasi yang dapat diperbarui secara berkala (Jiang *et al.*, 2025).

Keselamatan ketenagalistrikan menjadi komponen penting dalam inventarisasi. Database perlu mencatat kondisi aset yang berkaitan dengan risiko, misalnya tiang miring, kabel melendut, panel rusak, jarak bebas tidak sesuai, sistem arde tidak jelas, gardu tanpa tanda bahaya, atau LPJU yang tidak menyala dan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan publik. Prinsip keselamatan instalasi menekankan bahwa pemasangan, pengoperasian, dan pemanfaatan aset listrik harus memenuhi aspek keselamatan manusia, instalasi, lingkungan, dan operasi (Alquraiddi & Awad, 2024). Oleh sebab itu, status SLO, dokumentasi pengujian, serta tindak lanjut hasil inspeksi perlu menjadi bagian dari database inventarisasi. Sistem pemeliharaan proaktif pada jaringan distribusi membutuhkan informasi kondisi aset yang

terdokumentasi agar potensi gangguan dapat diantisipasi sebelum berdampak luas (Mortensen *et al.*, 2024). Pada instalasi penerangan jalan, pencatatan risiko juga relevan karena LPJU berkaitan dengan keselamatan publik, efisiensi energi, dan perlindungan lingkungan (Wardhana, 2024).

Optimalisasi pelayanan kelistrikan dapat dinilai dari kemampuan sistem dalam menyediakan pasokan yang kontinu, aman, cepat dipulihkan ketika terjadi gangguan, dan sesuai kebutuhan pelanggan. Indikator keandalan distribusi seperti SAIDI, SAIFI, CAIDI, waktu pemulihan, dan jumlah pelanggan terdampak menunjukkan pentingnya hubungan antara data aset, data pelanggan, data gangguan, dan histori pemeliharaan (Malek *et al.*, 2023). Database inventarisasi yang terstandar akan mempermudah analisis akar masalah gangguan, penentuan prioritas pemeliharaan preventif, dan perencanaan investasi jaringan secara lebih transparan (Mortensen *et al.*, 2024). Nilai aset dan pola kegagalan dapat digunakan untuk menilai efektivitas investasi terhadap penurunan tingkat gangguan sistem distribusi (Hedayati *et al.*, 2024). Selain itu, pemetaan kerentanan wilayah dapat membantu menentukan lokasi jaringan yang memerlukan prioritas pengawasan lebih tinggi (Santos *et al.*, 2023).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-teknis berbasis telaah dokumen, data sekunder, peta, dan perencanaan survei lapangan. Pendekatan ini sesuai karena tujuan utama artikel adalah menyusun rancangan inventarisasi aset jaringan listrik, bukan melakukan simulasi aliran daya, koordinasi proteksi, atau eksperimen laboratorium. Data yang dianalisis meliputi peta administrasi, rencana struktur ruang, peta jaringan listrik, single line diagram penyulang, data pelanggan Januari 2026, BOQ jaringan listrik, BOQ LPJU, serta gambar rencana jaringan Desa Mandi Aur Kecamatan Muara Kelingi. Penggunaan data sekunder dan dokumen teknis diarahkan untuk membangun baseline inventarisasi yang dapat divalidasi melalui survei lapangan pada tahap implementasi. Pendekatan perencanaan jaringan distribusi menekankan pentingnya baseline teknis sebelum keputusan penguatan sistem dilakukan (Dashti & Rouhandeh, 2023). Baseline tersebut juga sejalan dengan kebutuhan digitalisasi distribusi yang mensyaratkan ketersediaan data aset dan operasi secara terstruktur (Aghahadi *et al.*, 2024).

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah pelayanan kelistrikan dan kebutuhan data aset, studi literatur terbaru, pengumpulan data awal, klasifikasi objek inventarisasi, penyusunan parameter atribut, perencanaan survei lapangan, pengolahan data, analisis kondisi jaringan, rancangan field database, dan penyusunan rekomendasi teknis. Alur

ini mengikuti prinsip inventarisasi sebagai siklus kerja teknis yang membutuhkan perencanaan, standardisasi, validasi, pembaruan, dan tindak lanjut (Alquraidi & Awad, 2024). Setiap tahap diarahkan untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga dapat digunakan untuk membaca prioritas pelayanan dan risiko operasional. Dalam sistem pemeliharaan distribusi yang proaktif, data yang terstruktur menjadi dasar untuk menentukan prioritas inspeksi, tindakan pencegahan, dan pembaruan informasi aset (Mortensen *et al.*, 2024).

Objek inventarisasi yang dirumuskan meliputi tiang listrik, jaringan SUTM, jaringan SUTR, gardu atau trafo distribusi, peralatan proteksi, LPJU, panel, serta dokumen teknis/SLO. Setiap objek diberi parameter pencatatan yang berbeda sesuai fungsi teknisnya, tetapi seluruhnya harus memiliki kode unik, koordinat, foto, kondisi fisik, status operasi, dan tindak lanjut. Data kemudian dianalisis secara deskriptif dan spasial untuk mengidentifikasi prioritas awal inventarisasi, kebutuhan penguatan jaringan, serta rancangan field database. Pendekatan per penyulang digunakan untuk menjaga logika teknis jaringan, sedangkan rekapitulasi per kecamatan digunakan untuk memudahkan integrasi dengan perencanaan wilayah dan pelayanan publik. Model GIS jaringan distribusi menunjukkan bahwa hubungan antara penyulang, gardu, dan ruas jaringan perlu dipertahankan agar data dapat digunakan untuk analisis operasional (Jiang *et al.*, 2025). Sementara itu, pendekatan geospasial skala luas membantu menghubungkan lokasi aset dengan wilayah layanan dan dampak teknologi pada jaringan tegangan rendah (McGarry *et al.*, 2023).

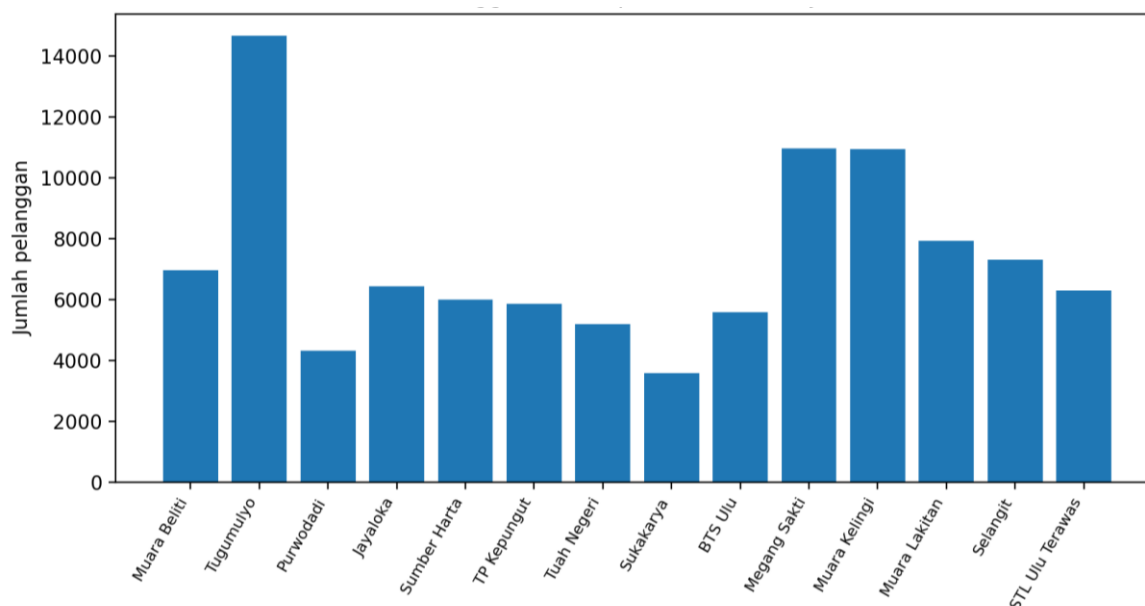
Validasi data dirancang melalui pemeriksaan kesesuaian antara data lapangan, peta, foto, dokumen teknis, data pelanggan, dan status operasi. Pengendalian mutu dilakukan dengan menetapkan format isian, definisi kondisi aset, satuan ukuran, kode wilayah, kode penyulang, struktur penamaan foto, status SLO, dan status tindak lanjut. Sebelum survei lapangan penuh, diperlukan uji coba form pada beberapa titik aset agar perbedaan interpretasi antarpetugas dapat dikurangi. Hasil uji coba digunakan untuk memperbaiki daftar atribut, memperjelas kategori kondisi aset, dan memastikan data yang masuk dapat diekspor ke platform SIG atau dashboard aset. Kesiapan data seperti ini menjadi salah satu syarat penting dalam pengembangan digital twin sistem energi (Aghazadeh Ardebili *et al.*, 2024). Selain itu, kajian smart grid menunjukkan bahwa tantangan digitalisasi tidak hanya terletak pada aplikasi, tetapi juga pada mutu data dan interoperabilitas antarplatform (Mchirgui *et al.*, 2024).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Wilayah dan Data Awal Pelayanan Kelistrikan

Wilayah sasaran inventarisasi meliputi 14 kecamatan, yaitu Muara Beliti, Tugumulyo, Purwodadi, Jayaloka, Sumber Harta, Tiang Pumpung Kepungut, Tuah Negeri, Sukakarya, BTS Ulu, Megang Sakti, Muara Kelingi, Muara Lakitan, Selangit, dan STL Ulu Terawas. Peta administrasi dan rencana struktur ruang menunjukkan bahwa jaringan listrik perlu dipahami dalam konteks koridor jalan, pusat pelayanan, permukiman, dan arah pengembangan wilayah. Keterkaitan data teknis dengan ruang penting karena jaringan distribusi umumnya mengikuti koridor jalan dan melayani pusat kegiatan masyarakat. Perubahan pusat pertumbuhan wilayah dapat memengaruhi kebutuhan penguatan jaringan dan prioritas layanan, terutama ketika infrastruktur energi dituntut lebih tangguh terhadap gangguan dan perubahan kebutuhan wilayah (Paul *et al.*, 2024). Kerentanan jaringan juga dapat berbeda antarruang sehingga pemetaan wilayah membantu menentukan lokasi yang memerlukan prioritas pengawasan (Santos *et al.*, 2023). Dalam perspektif infrastruktur berkelanjutan, pengelolaan jaringan perlu mempertimbangkan ketahanan, keselamatan, dan keberlanjutan layanan secara bersamaan (Mohanty *et al.*, 2024).

Data pelanggan Januari 2026 menunjukkan total 101.932 pelanggan pada 14 kecamatan, dengan komposisi 78.564 pelanggan pascabayar dan 23.368 pelanggan Prabayar. Proporsi pascabayar sebesar 77,07% dan Prabayar sebesar 22,93%. Informasi pelanggan memberikan gambaran awal tentang intensitas pelayanan jaringan. Kecamatan dengan pelanggan besar perlu menjadi prioritas awal pembaruan data karena gangguan, keterbatasan kapasitas, atau keterlambatan pemeliharaan di wilayah tersebut dapat berdampak pada jumlah pelanggan yang lebih banyak. Dalam perspektif manajemen risiko, sebaran pelanggan dapat digunakan sebagai indikator awal untuk menyusun urutan survei, segmentasi penyulang, dan prioritas validasi gardu (Malek *et al.*, 2023). Analisis nilai aset dan tingkat kegagalan dapat melengkapi prioritas tersebut agar keputusan investasi tidak hanya berbasis jumlah pelanggan, tetapi juga mempertimbangkan kondisi aset (Hedayati *et al.*, 2024). Sistem pemeliharaan proaktif membutuhkan keterhubungan data pelanggan, aset, dan riwayat gangguan supaya intervensi lapangan lebih tepat sasaran (Mortensen *et al.*, 2024).



Gambar 1. Sebaran pelanggan listrik per kecamatan berdasarkan data Januari 2026

Tabel 1. Kecamatan dengan konsentrasi pelanggan tertinggi

No	Kecamatan	Total pelanggan	Proporsi	Prioritas awal
1	Tugumulyo	14.649	14,37%	Sangat tinggi
2	Megang Sakti	10.949	10,74%	Sangat tinggi
3	Muara Kelingi	10.929	10,72%	Sangat tinggi
4	Muara Lakitan	7.914	7,76%	Tinggi
5	Selangit	7.312	7,17%	Tinggi

Tabel 1 menunjukkan bahwa Tugumulyo, Megang Sakti, Muara Kelingi, Muara Lakitan, dan Selangit menjadi wilayah prioritas awal. Prioritas ini tidak berarti kecamatan lain dapat diabaikan, tetapi menunjukkan urutan teknis untuk memulai inventarisasi rinci. Pada wilayah pelanggan tinggi, pendataan gardu, kapasitas trafo, jaringan tegangan rendah, titik percabangan, panel, dan titik pelanggan prioritas perlu dilakukan lebih detail agar pemeliharaan preventif dan respons gangguan dapat diarahkan secara tepat. Data pelanggan juga perlu dihubungkan dengan aset gardu dan rute jaringan agar dampak gangguan dapat diperkirakan lebih cepat dan tindakan pemulihan dapat diprioritaskan secara rasional (Malek *et al.*, 2023). Prioritas tersebut dapat dipertajam dengan menilai nilai aset dan kontribusinya terhadap tingkat kegagalan distribusi (Hedayati *et al.*, 2024). Pada tahap berikutnya, hasil inventarisasi dapat dipakai untuk menyusun rencana pemeliharaan berbasis kondisi dan alokasi sumber daya (Taghitahoonah *et al.*, 2026).

Peta Penyulang, Gardu, dan Implikasi Operasional

Peta jaringan listrik wilayah kerja ULP Muara Beliti dan single line diagram penyulang menunjukkan adanya variasi panjang penyulang dan jumlah gardu. Dalam sistem distribusi, panjang penyulang dan jumlah gardu berkaitan dengan kebutuhan inspeksi, pemeliharaan, penanganan gangguan, serta potensi isu tegangan ujung. Literatur perencanaan distribusi menegaskan bahwa panjang penyulang, titik percabangan, karakteristik beban, dan kondisi peralatan berpengaruh terhadap kualitas operasi jaringan (Dashti & Rouhandeh, 2023). Karena itu, inventarisasi harus mempertahankan relasi teknis antara ruas jaringan, gardu, proteksi, dan pelanggan yang dilayani. Data topologi yang baik juga penting untuk pemodelan jaringan berbasis QGIS dan OpenDSS (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024). Pada jaringan tegangan rendah, visualisasi GIS dapat membantu membaca persoalan mutu daya dan potensi penggeseran beban (Antic & Capuder, 2024). Ketersediaan data aset dan topologi turut mendukung koordinasi proteksi distribusi yang lebih akurat dalam platform GIS distribusi (Jiang *et al.*, 2025). Data teknis tersebut juga diperlukan untuk mengevaluasi koordinasi proteksi adaptif pada sistem distribusi dengan kontribusi sumber energi terdistribusi (Zhan *et al.*, 2023).

Tabel 2 memperlihatkan bahwa inventarisasi sebaiknya dilakukan berdasarkan penyulang dan kemudian direkapitulasi per kecamatan. Pendekatan per penyulang menjaga logika teknis jaringan, sedangkan rekapitulasi per kecamatan memudahkan integrasi dengan perencanaan wilayah. Pada Kapel Megang Sakti, panjang penyulang yang relatif besar membutuhkan segmentasi rute survei. Pada Kapel Tugu Mulyo dan Kapel Muara Lakitan, jumlah gardu yang tinggi menuntut pencatatan kapasitas trafo, status panel, proteksi, arde, dan beban pelayanan secara lebih rinci. Prinsip manajemen aset menempatkan risiko, kinerja, nilai aset, dan biaya pemeliharaan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis (Alquraidi & Awad, 2024). Dalam perencanaan sistem distribusi, informasi tersebut membantu menentukan kebutuhan penguatan, rehabilitasi, dan prioritas investasi jaringan (Dashti & Rouhandeh, 2023). Penggunaan model kecerdasan buatan dalam manajemen aset juga menuntut data historis dan atribut aset yang konsisten agar analisis kinerja lebih dapat dipercaya (Rajora *et al.*, 2024).

Tabel 2. Ringkasan peta penyulang dan gardu pelayanan

No	Penyulang/posko	Panjang penyulang	Jumlah gardu	Implikasi inventarisasi
1	Kapel Megang Sakti	±239,42 km	151	Rute inspeksi perlu dibagi per segmen dan titik kritis.
2	Kapel Tugu Mulyo	±165,88 km	193	Pendataan gardu dan trafo perlu diprioritaskan karena jumlah gardu tinggi.
3	Posko Beliti	±172,59 km	113	Perlu verifikasi ruas utama dan percabangan pelayanan.
4	Kapel Cekar	±154,47 km	92	Inventarisasi difokuskan pada ruas panjang dan titik akses sulit.
5	Kapel Muara Lakitan	±88,11 km	185	Jumlah gardu tinggi memerlukan kode aset dan histori pemeliharaan.
6	Kapel Muara Kelingi	±86,64 km	53	Perlu integrasi dengan rencana jaringan Desa Mandi Aur.
7	Kapel Jayaloka	±117,09 km	65	Perlu pembaruan peta rute dan status aset.

Rencana Jaringan Desa Mandi Aur dan Kebutuhan Material

Rencana jaringan Desa Mandi Aur Kecamatan Muara Kelingi digunakan sebagai contoh kasus teknis untuk menunjukkan jenis data yang harus masuk dalam sistem inventarisasi sejak tahap perencanaan. Pemisahan antara aset rencana, aset dalam pekerjaan, aset terpasang, aset diuji, dan aset beroperasi penting agar database tidak mencampur data desain dengan kondisi aktual lapangan. Prinsip keselamatan aset menuntut agar instalasi yang beroperasi memenuhi pemeriksaan, pengujian, dan persyaratan kelaikan operasi (Alquraidi & Awad, 2024). Pada tahap pemeliharaan, data kondisi dan status operasi aset diperlukan untuk merancang sistem pemeliharaan proaktif (Mortensen *et al.*, 2024). Pada tahap digitalisasi lanjutan, data rencana dan data terpasang dapat menjadi fondasi pembaruan model jaringan serta pengembangan digital twin pada area distribusi tegangan rendah (Peng *et al.*, 2025).

Tabel 3 menunjukkan bahwa rencana jaringan tidak hanya menghasilkan kebutuhan konstruksi, tetapi juga kebutuhan data inventarisasi. Setiap tiang, ruas SUTM, ruas SUTR, gardu, trafo, panel, arde, dan dokumen SLO perlu diberi kode aset. Kode unik memungkinkan pembaruan data ketika aset berubah status dari rencana menjadi terpasang, diuji, dan beroperasi. Penggunaan kode unik juga mengurangi risiko duplikasi data dan memperkuat hubungan antara foto lapangan, peta, BOQ, dokumen kelaikan, serta histori pemeliharaan. Dengan demikian, BOQ tidak hanya berfungsi sebagai dokumen biaya, tetapi juga sebagai sumber awal struktur database aset. Integrasi data aset dengan peta dan model jaringan mendukung proses simulasi dan evaluasi teknis distribusi secara lebih tertelusur (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024). Sistem GIS berbasis web dapat memanfaatkan struktur data tersebut untuk memperlihatkan hubungan aset, jaringan, dan fungsi proteksi (Jiang *et al.*, 2025).

Pendekatan geospasial juga memudahkan penilaian dampak jaringan pada wilayah layanan yang luas (McGarry *et al.*, 2023).

Tabel 3. Ringkasan kebutuhan material jaringan Desa Mandi Aur

Kelompok pekerjaan	Volume utama	Keterangan teknis inventarisasi
Pemasangan jaringan SUTM	0,8 km	AAAC-S 70 sqmm 2.427,84 m, tiang beton 13/350 daN + E 4 batang, tiang beton 11/200 daN 13 batang, tiang beton 7/100 daN 2 batang, isolator, aksesoris penegang, dan perlengkapan keselamatan.
Pemasangan gardu cantol	1 unit	Trafo distribusi 50 kVA 3 fasa 20 kV, cross arm, lightning arrester, cut out, LV panel, kabel NYY, arde, plat tanda bahaya, dan komponen pengaman gardu.
Pemasangan jaringan SUTR	3,05 km	LVTC 3x35 + 1x25 sqmm 3.085,38 m, tiang beton 9 m 200 daN 53 batang, perlengkapan TR, ATR/arde, guy wire, klem, konektor, dan sambungan.
Sertifikat Laik Operasi	1 ls	SLO perlu dicatat sebagai bukti pemenuhan pemeriksaan, pengujian, dan kelaikan operasi sebelum aset dinyatakan beroperasi.

Inventarisasi LPJU dan Pelayanan Publik

LPJU merupakan bagian dari pelayanan infrastruktur yang berkaitan dengan keamanan, kenyamanan, mobilitas malam hari, dan aktivitas sosial ekonomi masyarakat. Walaupun LPJU bukan sambungan pelanggan rumah tangga, keberadaannya sangat dirasakan oleh masyarakat sehingga perlu diinventarisasi dalam satu sistem data bersama panel, sumber suplai, pengaman, kabel, status nyala, daya lampu, kondisi tiang, dan status pemeliharaan. Standardisasi instalasi listrik dan keselamatan ketenagalistrikan menuntut agar instalasi publik dikelola secara aman, hemat energi, dapat ditelusuri, dan mudah direspons ketika terjadi kerusakan atau pengaduan masyarakat (Wardhana, 2024). Pengelolaan energi yang lebih efisien pada fasilitas publik dapat diperkuat melalui sistem pemantauan dan pendekatan machine learning pada manajemen energi (Lee *et al.*, 2024). Dalam konteks perkotaan, sistem informasi geografis LPJU dapat menghubungkan titik lampu, panel, status pemeliharaan, dan kanal pelaporan masyarakat (Pragestu & Astarani, 2025).

Tabel 4. Ringkasan kebutuhan material LPJU

Kelompok pekerjaan	Volume utama	Parameter inventarisasi yang diperlukan
Pemasangan LPJU	10 titik	Koordinat titik lampu, jenis lampu LED 40 watt, stang galvanis, kondisi nyala, foto, dan status pemeliharaan.
Panel dan pengaman LPJU	1 set	Box panel PJU, MCB 20 A, arde, photocell, konektor, sumber suplai, status panel, dan catatan inspeksi.
Administrasi dan pengujian	1 paket	Setoran PJU 900 VA, komisioning, SLO LPJU, dan tracking GPS sebagai dasar database titik lampu.

Tabel 4 menegaskan bahwa inventarisasi LPJU harus mencakup titik koordinat, kondisi nyala, daya, panel, status photocell, kondisi kabel, arde, dan histori pemeliharaan. Tanpa data tersebut, laporan kerusakan lampu jalan sulit dilacak dan prioritas perbaikan cenderung bergantung pada pengaduan sporadis. Integrasi LPJU ke dalam database spasial membantu pemerintah daerah membaca area yang belum terlayani penerangan dan titik yang berpotensi menimbulkan risiko keselamatan publik (Wardhana, 2024). Database LPJU juga dapat digunakan untuk menilai lokasi yang membutuhkan efisiensi energi melalui penggantian lampu, perbaikan panel, atau perbaikan mekanisme pelaporan digital (Pragestu & Astarani, 2025).

Rancangan Database dan Pengendalian Mutu Inventarisasi

Hasil kajian menunjukkan bahwa database inventarisasi perlu dirancang agar dapat diekspor ke SIG dan diperbarui secara berkala. Field database harus sederhana, tetapi cukup untuk menggambarkan identitas, lokasi, kondisi, fungsi, dan status aset. Database yang terlalu umum tidak dapat mendukung analisis teknis, sedangkan database yang terlalu kompleks dapat menyulitkan petugas lapangan. Oleh karena itu, struktur field perlu menyeimbangkan kebutuhan teknis, kemudahan pengisian, interoperabilitas, dan kebutuhan validasi. Pada tahap digitalisasi lanjutan, database yang konsisten dapat menjadi fondasi dashboard aset dan prediksi pemeliharaan. Digital twin sistem energi membutuhkan data yang lengkap, konsisten, dan dapat diperbarui agar representasi digital tidak menyimpang dari kondisi fisik aset (Aghazadeh Ardebili *et al.*, 2024). Integrasi digital twin pada smart grid juga menuntut perhatian pada keberlanjutan, keamanan, dan efisiensi sistem (Alharbey *et al.*, 2024). Dalam praktik distribusi, data spasial yang siap ekspor dapat menghubungkan inventarisasi dengan model jaringan dan analisis operasional (De-Jesus-Grullon *et al.*, 2024). Pada tahap masa depan, sensor dan digital twin dapat memperkuat kesiapan jaringan cerdas jika database awal telah tertata (Malik *et al.*, 2026).

Tabel 5. Rancangan field database inventarisasi aset

Nama field	Isi/kegunaan	Contoh
ID_Aset	Kode unik aset yang tidak berubah	MRW-MK-SUTM-001
Jenis_Aset	Kategori aset	Tiang, SUTM, SUTR, Trafo, LPJU, Panel
Penyulang	Nama penyulang atau posko pelayanan	Kapel Muara Kelingi
Kecamatan/Desa	Lokasi administrasi aset	Muara Kelingi/Mandi Aur
Koordinat_X/Y	Longitude-latitude atau koordinat UTM	102.xxx; -3.xxx
Spesifikasi	Material, kapasitas, panjang, daya, atau tipe	Trafo 50 kVA; LED 40 W
Kondisi	Kondisi fisik aset	Baik/Sedang/Rusak/Perlu tindakan

Status_Aset	Status realisasi atau operasi	Eksisting/Rencana/Terpasang/Beroperasi
Foto	Nama file foto bukti lapangan	MRW-MK-SUTM-001.jpg
Status_SLO	Status dokumen kelaikan operasi	Ada/Belum/Tidak relevan
Tindak_Lanjut	Rekomendasi pemeliharaan atau pembaruan	Inspeksi detail/perbaikan

Tabel 5 merupakan rancangan minimal yang dapat dikembangkan menjadi basis data digital. Field ID_Aset, koordinat, foto, kondisi, dan status tindak lanjut merupakan komponen kunci untuk membangun data yang dapat diaudit. Status SLO perlu dimasukkan karena aset kelistrikan tidak hanya harus tersedia secara fisik, tetapi juga harus memenuhi persyaratan keselamatan dan kelaikan operasi (Alquraidi & Awad, 2024). Penggunaan struktur field yang konsisten akan memudahkan pembaruan data, pengendalian mutu, audit aset, dan integrasi dengan data gangguan atau pengaduan pelanggan pada tahap berikutnya. Sistem pemeliharaan digital memerlukan data kondisi aset yang dapat dipercaya agar keputusan inspeksi dan tindak lanjut lebih tepat (Mortensen *et al.*, 2024). Pada pengembangan yang lebih maju, data inventarisasi dapat dipadukan dengan arsitektur IoT dan digital twin untuk mendukung pemantauan energi berbasis data (Kabir *et al.*, 2024).

Permasalahan, Dampak, dan Arah Optimalisasi

Permasalahan utama yang teridentifikasi adalah data aset belum terintegrasi spasial, panjang penyulang dan cakupan pelayanan luas, data pelanggan belum terhubung dengan data teknis aset, rencana jaringan belum dibedakan dari aset terpasang, LPJU belum sepenuhnya memiliki titik dan panel yang terdokumentasi, serta status SLO perlu ditelusuri. Masalah ini berdampak terhadap kecepatan penanganan gangguan, ketepatan pemeliharaan, dan akurasi perencanaan penguatan jaringan. Literatur digitalisasi distribusi menegaskan bahwa hambatan utama modernisasi jaringan sering kali bukan hanya perangkat teknologi, tetapi juga kesiapan data, standar informasi, interoperabilitas, dan tata kelola pembaruan data (Aghahadi *et al.*, 2024). Analisis hambatan kebijakan dan organisasi menunjukkan bahwa digitalisasi jaringan distribusi memerlukan prioritas implementasi yang realistis serta dukungan kelembagaan yang konsisten (Monaco *et al.*, 2024). Kajian smart grid juga menekankan bahwa tantangan digital twin mencakup integrasi data, keamanan, dan kemampuan sistem untuk digunakan lintas platform (Mchirgui *et al.*, 2024).

Tabel 6. Permasalahan, dampak, dan rekomendasi teknis

Permasalahan	Dampak	Rekomendasi teknis
Data aset belum terintegrasi spasial	Lokasi aset sulit dilacak dan pembaruan peta lambat	Membangun database aset berbasis koordinat, foto, kode unik, dan peta digital.
Panjang penyulang dan cakupan luas	Inspeksi lapangan memerlukan waktu lama	Membagi rute inspeksi berdasarkan penyulang, kecamatan, gardu, dan prioritas pelanggan.
Data pelanggan belum terhubung dengan aset	Prioritas pelayanan belum berbasis beban dan kondisi jaringan	Mengintegrasikan data pelanggan dengan data gardu, trafo, jaringan TR, dan wilayah pelayanan.
Aset rencana bercampur dengan aset terpasang	Database berisiko tidak menggambarkan kondisi lapangan	Menambahkan status aset: eksisting, rencana, dalam pekerjaan, terpasang, diuji, dan beroperasi.
LPJU belum terdata rinci	Pemeliharaan lampu jalan sulit dipantau	Membuat kode aset LPJU, koordinat, panel, daya lampu, status nyala, dan status photocell.
Dokumen SLO perlu ditelusuri	Risiko administrasi kelaikan operasi tidak lengkap	Menambahkan status SLO, tanggal pengujian, dokumen pendukung, dan tindak lanjut.

Tabel 6 menunjukkan bahwa optimalisasi pelayanan kelistrikan tidak harus selalu dimulai dari pembangunan fisik baru. Pembentukan data aset dapat menjadi intervensi awal yang berdampak pada efisiensi pemeliharaan dan ketepatan keputusan teknis. Dalam perspektif keandalan distribusi, data aset yang terhubung dengan data pelanggan, gangguan, dan histori pemeliharaan akan memudahkan evaluasi SAIDI, SAIFI, jumlah pelanggan terdampak, serta waktu pemulihan gangguan pada tahap berikutnya (Malek *et al.*, 2023). Dengan data yang terstandar, prioritas pemeliharaan dapat disusun berdasarkan kombinasi kondisi aset, tingkat risiko, cakupan pelanggan, dan dampak pelayanan. Investasi pada aset distribusi dapat dievaluasi melalui pengaruhnya terhadap tingkat kegagalan dan nilai layanan (Hedayati *et al.*, 2024). Sementara itu, sistem pemeliharaan proaktif menuntut keterhubungan data aset, histori gangguan, dan keputusan tindak lanjut agar penanganan jaringan tidak hanya reaktif (Mortensen *et al.*, 2024).

Strategi implementasi inventarisasi perlu dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah konsolidasi data awal dan penetapan standar field database. Tahap kedua adalah survei prioritas pada kecamatan dengan pelanggan tinggi dan penyulang dengan cakupan luas. Tahap ketiga adalah verifikasi data, integrasi ke peta digital, serta pengujian dashboard sederhana. Tahap keempat adalah pembaruan rutin setiap terjadi pemasangan baru, perbaikan, penggantian, atau perubahan status operasi. Strategi bertahap ini penting agar inventarisasi tidak berhenti sebagai dokumen, tetapi menjadi sistem kerja berkelanjutan. Pendekatan tersebut selaras dengan digitalisasi jaringan distribusi yang menekankan kesiapan data dan prioritas investasi sebelum sistem digital yang lebih kompleks dikembangkan (Aghahadi *et al.*, 2024).

Interoperabilitas dan dukungan kebijakan menjadi faktor penting agar digitalisasi distribusi berjalan efektif (Monaco *et al.*, 2024). Pada tahap lanjutan, digital twin dapat dikembangkan jika data aset, sensor, dan keamanan sistem sudah siap (Heluany & Gkioulos, 2024). Pengembangan tersebut juga relevan dengan modernisasi grid berkelanjutan yang mengintegrasikan energi terbarukan, penyimpanan energi, dan vehicle-to-grid (Al-Shetwi *et al.*, 2025). Pembelajaran penguatan jaringan melalui digital twin dan reinforcement learning menunjukkan bahwa model digital dapat membantu membaca struktur jaringan dan pola beban ketika data dasarnya memadai (Hua *et al.*, 2023). Integrasi sensor dan digital twin pada smart grid masa depan juga menuntut database aset yang terus diperbarui (Malik *et al.*, 2026).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Perencanaan inventarisasi infrastruktur jaringan listrik di Kabupaten Musi Rawas menunjukkan bahwa optimalisasi pelayanan kelistrikan tidak hanya bergantung pada penambahan aset fisik, tetapi juga pada ketersediaan basis data aset yang akurat, terstandar, berbasis koordinat, dan terintegrasi dengan peta spasial. Data Januari 2026 mencatat sebanyak 101.932 pelanggan yang tersebar pada 14 kecamatan sasaran, dengan konsentrasi pelanggan tertinggi berada di Kecamatan Tugumulyo, Megang Sakti, Muara Kelingi, dan Muara Lakitan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa wilayah dengan jumlah pelanggan besar perlu menjadi prioritas awal dalam kegiatan inventarisasi rinci, karena pembaruan data aset pada kawasan padat layanan akan memberikan dampak langsung terhadap peningkatan kualitas pelayanan, efektivitas pemeliharaan, serta kecepatan penanganan gangguan kelistrikan.

Objek inventarisasi yang perlu dicatat secara sistematis meliputi tiang, jaringan SUTM, SUTR, gardu atau trafo distribusi, peralatan proteksi, LPJU, panel, serta dokumen teknis dan Sertifikat Laik Operasi (SLO). Rencana jaringan Desa Mandi Aur memperlihatkan pentingnya pembedaan status aset, mulai dari tahap rencana, dalam pekerjaan, terpasang, diuji, hingga beroperasi. Oleh karena itu, rancangan database minimal perlu memuat kode aset, jenis aset, penyulang, lokasi kecamatan dan desa, koordinat, spesifikasi teknis, kondisi aset, status aset, foto lapangan, status SLO, serta tindak lanjut yang diperlukan. Inventarisasi sebaiknya dilaksanakan secara bertahap dengan prioritas pada wilayah pelanggan tinggi dan penyulang yang panjang, disertai kesepakatan antara pemerintah daerah, pengelola jaringan, OPD teknis, dan pihak terkait mengenai standar field database, kode aset, prosedur survei, validasi, serta pembaruan data. Kegiatan lanjutan perlu diarahkan pada survei koordinat langsung, validasi kondisi fisik aset, integrasi data gangguan dan pengaduan, penelusuran dokumen SLO, serta pengembangan dashboard aset agar hasil inventarisasi dapat digunakan secara nyata dalam

pengambilan keputusan teknis, pengendalian keselamatan, audit aset, pengelolaan LPJU, dan peningkatan pelayanan kelistrikan di Kabupaten Musi Rawas.

DAFTAR REFERENSI

- Aghahadi, M., Bosisio, A., Merlo, M., Berizzi, A., Pegoiani, A., & Forciniti, S. (2024). Digitalization processes in distribution grids: A comprehensive review of strategies and challenges. *Applied Sciences*, 14(11), 4528. <https://doi.org/10.3390/app14114528>
- Aghazadeh Ardebili, A., Zappatore, M., Ramadan, A. I. H. A., Longo, A., & Ficarella, A. (2024). Digital Twins of smart energy systems: A systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges. *Energy Informatics*, 7, 94. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00385-5>
- Alharbey, R., Shafiq, A., Daud, A., Dawood, H., Bukhari, A., & Alshemaimri, B. (2024). Digital twin technology for enhanced smart grid performance: Integrating sustainability, security, and efficiency. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1397748. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1397748>
- Alquraiddi, A., & Awad, M. (2024). Physical asset management for critical utilities-A systematic literature review. *IEEE Access*, 12, 90644-90659. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3421335>
- Al-Shetwi, A. Q., Atawi, I. E., El-Hameed, M. A., & Abuelrub, A. (2025). Digital twin technology for renewable energy, smart grids, energy storage and vehicle-to-grid integration: Advancements, applications, key players, challenges and future perspectives in modernising sustainable grids. *IET Smart Grid*, 8(1), e70026. <https://doi.org/10.1049/stg2.70026>
- Antic, T., & Capuder, T. (2024). A geographic information system-based modelling, analysing and visualising of low voltage networks: The potential of demand time-shifting in the power quality improvement. *Applied Energy*, 353, 122056. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122056>
- Dashti, R., & Rouhandeh, M. (2023). Power distribution system planning framework (A comprehensive review). *Energy Strategy Reviews*, 50, 101256. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101256>
- De-Jesus-Grullon, R. E., Batista Jorge, R. O., Espinal Serrata, A., Bueno Diaz, J. E., Pichardo Estevez, J. J., & Guerrero-Rodriguez, N. F. (2024). Modeling and simulation of distribution networks with high renewable penetration in open-source software: QGIS and OpenDSS. *Energies*, 17(12), 2925. <https://doi.org/10.3390/en17122925>
- Hedayati, M., Taghitahoonch, M., Shaghghi, A., & Dashti, R. (2024). Influence of investment on failure rate in power distribution systems based on the value of assets. *International Journal of Reliability and Safety*, 18(2), 209-230. <https://doi.org/10.1504/IJRS.2024.139218>
- Heluany, J. B., & Gkioulos, V. (2024). A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security*, 23, 1171-1195. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00784-x>

- Hua, W., Stephen, B., & Wallom, D. C. H. (2023). Digital twin based reinforcement learning for extracting network structures and load patterns in planning and operation of distribution systems. *Applied Energy*, 342, 121128. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121128>
- Jiang, J.-L., Zhan, T.-S., & Tsai, M.-T. (2025). A web-based distribution network Geographic Information System with protective coordination functionality. *Energies*, 18(15), 4127. <https://doi.org/10.3390/en18154127>
- Joobeni, A. Y., Naghavi, M., & Dashti, R. (2026). Economic sustainability of urban power distribution asset management: A framework for stability planning in metropolitan grids. *Results in Engineering*, 29, 108583. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108583>
- Kabir, M. R., Halder, D., & Ray, S. (2024). Digital Twins for IoT-driven energy systems: A survey. *IEEE Access*, 12, 177123-177143. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3506660>
- Lee, S., Seon, J., Hwang, B., Kim, S., Sun, Y., & Kim, J. (2024). Recent trends and issues of energy management systems using machine learning. *Energies*, 17(3), 624. <https://doi.org/10.3390/en17030624>
- Malek, A. F., Mokhlis, H., Mansor, N. N., Jamian, J. J., Wang, L., & Muhammad, M. A. (2023). Power distribution system outage management using improved resilience metrics for smart grid applications. *Energies*, 16(9), 3953. <https://doi.org/10.3390/en16093953>
- Malik, M. T., Obaid, H. M., & Rasool, H. F. (2026). Integrating digital twin and sensor technologies for future-ready smart grids. *Discover Electronics*, 3, 42. <https://doi.org/10.1007/s44291-026-00196-w>
- McGarry, C., Anderson, A. C., Elders, I., & Galloway, S. (2023). A scalable geospatial data-driven localization approach for modelling of low voltage distribution networks and low carbon technology impact assessment. *IEEE Access*, 11, 64567-64585. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288811>
- Mchirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A. (2024). The applications and challenges of digital twin technology in smart grids: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 14(23), 10933. <https://doi.org/10.3390/app142310933>
- Mohanty, A., Ramasamy, A. K., Verayiah, R., Bastia, S., Dash, S. S., Cuce, E., Khan, T. M. Y., & Soudagar, M. E. M. (2024). Power system resilience and strategies for a sustainable infrastructure: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 105, 261-279. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.06.092>
- Monaco, R., Bergaentzle, C., Leiva Vilaplana, J. A., Ackom, E., & Nielsen, P. S. (2024). Digitalization of power distribution grids: Barrier analysis, ranking and policy recommendations. *Energy Policy*, 188, 114083. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114083>
- Mortensen, L. K., Sundsgaard, K., Shaker, H. R., Hansen, J. Z., & Yang, G. (2024). Designing digitally enabled proactive maintenance systems in power distribution grids: A scoping literature review. *Energy Reports*, 12, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.08.044>
- Paul, S., Poudyal, A., Poudel, S., Dubey, A., & Wang, Z. (2024). Resilience assessment and planning in power distribution systems: Past and future considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(Part B), 113991. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113991>

- Peng, Y., Zhao, F., Zhou, K., Yu, X., Jin, Q., Li, R., & Shuai, Z. (2025). Review of digital twin technology in low-voltage distribution area and the implementation path based on the 6C development goals. *Energies*, 18(17), 4459. <https://doi.org/10.3390/en18174459>
- Pragestu, S., & Astarani, J. (2025). Pengembangan Sistem Informasi Geografis Penerangan Jalan Umum Kota Pontianak dengan integrasi Telegram Bot API. *Jurnal Teknik Informatika dan Teknologi Informasi*, 5(3), 01-17. <https://doi.org/10.55606/jutiti.v5i3.6068>
- Rajora, G. L., Sanz-Bobi, M. A., Bertling Tjernberg, L., & Urrea Cabus, J. E. (2024). A review of asset management using artificial intelligence-based machine learning models: Applications for the electric power and energy system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18(12), 2155-2170. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13183>
- Santos, A. S., Faria, L. T., Lopes, M. L. M., & Minussi, C. R. (2023). Power distribution systems vulnerability by regions caused by electrical discharges. *Energies*, 16(23), 7790. <https://doi.org/10.3390/en16237790>
- Taghitahooneh, M. T., Shaghaghi, A., Rezaei, V., Zahedi, R., & Dashti, R. (2026). Optimization of maintenance planning in power distribution systems using a discrete-time Markov chain model: Asset analysis and resource allocation. *Energy Strategy Reviews*, 65, 102193. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2026.102193>
- Wardhana, Y. M. A. (2024). The provision of public street lighting based on risk mitigation for energy efficiency and environmental protection. *Prisma Sains: Jurnal Pengkajian Ilmu dan Pembelajaran Matematika dan IPA IKIP Mataram*, 12(1), 148-159. <https://doi.org/10.33394/j-ps.v12i1.10519>
- Zhan, T.-S., Su, C.-L., Lee, Y.-D., Jiang, J.-L., & Yu, J.-T. (2023). Adaptive OCR coordination in distribution system with distributed energy resources contribution. *AIMS Energy*, 11(6), 1278-1305. <https://doi.org/10.3934/energy.2023058>