

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian yang Relevan

Penelitian-penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan inspeksi gardu distribusi maupun penerapan teknologi validasi data telah memberikan gambaran awal mengenai berbagai pendekatan yang bisa digunakan. Berbagai studi ini menegaskan pentingnya keakuratan data lapangan untuk menjaga keandalan sistem distribusi, sekaligus menunjukkan potensi teknologi digital seperti NFC, QR Code, GPS/geofencing, dan validasi waktu sebagai solusi pendukung. Dengan meninjau penelitian-penelitian yang relevan, dapat dipetakan posisi penelitian ini serta celah (*gap*) yang ingin diisi.

2.1.1. Daftar Penelitian

a. Penggunaan NFC dalam manajemen aset dan inspeksi

Penelitian mengenai penerapan NFC menunjukkan bahwa teknologi ini sangat efektif dalam mempercepat proses pencatatan serta meminimalkan kesalahan manual. Sistem inventarisasi berbasis NFC pada perangkat Android, misalnya, terbukti mampu mempercepat pelacakan dan memastikan data yang dicatat lebih akurat [5]. Studi lain mengembangkan sistem otomatis berbasis NFC untuk manajemen aset di lingkungan *sharing economy*, yang menegaskan kemampuan NFC dalam memberikan identitas unik pada objek fisik serta keterhubungannya dengan basis data digital [6]. Kedua penelitian ini memperkuat relevansi pemanfaatan NFC dalam proyek ini sebagai mekanisme validasi utama untuk memastikan kehadiran petugas di gardu saat inspeksi.

b. QR Code sebagai mekanisme Cadangan

QR Code juga banyak digunakan sebagai sarana identifikasi karena murah dan mudah diproduksi. Namun, sejumlah penelitian menyoroti kelemahannya, yaitu mudah digandakan atau dipalsukan jika bersifat statis. [7] mengusulkan *Secure QR Code Authentication Protocol* (SQRAP) yang menambahkan *time-limited token* dan tanda tangan digital untuk meningkatkan keamanannya. Sementara itu, studi dari [9]

mengungkapkan adanya risiko serangan replay pada sistem login berbasis QR di dunia nyata. Berdasarkan temuan tersebut, dalam penelitian ini QR Code ditempatkan sebagai opsi fallback jika NFC tidak dapat digunakan, namun tetap diperkuat dengan validasi lokasi (GPS/*geofencing*) dan pembatasan waktu agar potensi penyalahgunaan dapat diminimalisasi.

c. GPS dan geofencing untuk validasi Lokasi

Teknologi GPS dengan *geofencing* sudah banyak dimanfaatkan dalam aplikasi mobile berbasis lokasi. [11] menunjukkan bahwa penerapan *geofencing* pada aplikasi Android efektif untuk memicu aksi tertentu saat perangkat memasuki area yang ditentukan, misalnya promosi di pusat perbelanjaan. [8] juga membuktikan bahwa *geofencing* dapat digunakan dalam penelitian perilaku untuk mendeteksi aktivitas masuk/keluar area geografis secara akurat. Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *geofencing* merupakan mekanisme yang tepat untuk memastikan validasi lokasi dalam sistem inspeksi, karena memungkinkan input data hanya dilakukan dalam radius tertentu dari gardu yang sudah terdaftar.

d. Penelitian inspeksi gardu dan ketidakseimbangan beban

Penelitian lapangan dari Universitas Bangka Belitung mengukur kondisi ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi selama sepuluh hari, dan menemukan bahwa rata-rata ketidakseimbangan arus sebesar 9,91%, dengan nilai maksimum mencapai 24,31%. Rugi-rugi konduktor netral akibat ketidakseimbangan beban tercatat sebesar 0,46 kWh selama periode tersebut, dan total rugi konduktor mencapai 18,122 kWh dalam 10 hari [12].

Studi lain dari Fakultas Teknik UNTAN menyimpulkan bahwa ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan meningkatnya arus netral, yang pada gilirannya meningkatkan kerugian energi. Dalam kasus trafo ST 263 200 kVA, penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban masih berada dalam standar, tetapi inspeksi rutin tetap diperlukan untuk mengurangi kerugian tersebut [4].

Penelitian terkini juga menyoroti bahwa beban tidak seimbang menjadi semakin penting dalam jaringan distribusi modern, terutama akibat pertumbuhan beban satu fasa, panel surya terdistribusi, dan kendaraan listrik. Strategi kontrol seperti

kompensasi fase atau pengaturan aliran daya terdistribusi telah diusulkan untuk mengurangi dampak negative ketidakseimbangan beban [13].

Lebih jauh, analisis model prediktif menunjukkan bahwa beban tidak seimbang dapat memperbesar rugi transformator pada jaringan tegangan rendah. Misalnya, penelitian *Intelligent Prediction of Transformer Loss for Low Voltage Distribution Networks* menyebut bahwa ketidakseimbangan beban di jaringan LV menyebabkan peningkatan kehilangan daya trafo dan mempengaruhi tegangan terminal [9].

Tabel 2. 1. Daftar Penelitian yang Relevan

NO	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	<i>Android Based Inventory Management with NFC Enabled for Faster Tracking Items (2021)</i>	Proses inventarisasi manual lambat dan rawan kesalahan	Pengembangan aplikasi inventarisasi berbasis NFC pada Android	Mempercepat pelacakan item, mengurangi kesalahan pencatatan	Belum diterapkan pada inspeksi gardu distribusi dan validasi data lapangan
2	<i>Automated NFC-Based System for Management and Tracking of Assets in Sharing Economy (2021)</i>	Sulitnya pelacakan aset dalam sistem berbagi	Implementasi sistem otomatis berbasis NFC untuk manajemen aset	NFC terbukti mampu memberi identitas unik pada aset & meningkatkan akurasi manajemen	Fokus masih pada aset umum, belum dikaitkan dengan inspeksi trafo/gardu distribusi

3	<i>Secure QR Code Authentication Protocol (SQRAP) – OASIS (2022)</i>	QR statis mudah dipalsukan / diduplikasi	Desain protokol QR dinamis dengan token sementara & tanda tangan digital	QR menjadi lebih aman untuk autentikasi	Belum diuji dalam konteks inspeksi lapangan distribusi listrik
4	<i>The Use of Geofencing in Android-Based Mobile Applications</i> (Susanto et al., 2023)	Perlu kontrol lokasi berbasis radius pada aplikasi mobile	Studi implementasi geofencing untuk promosi pusat belanja	Geofencing efektif memicu aksi berbasis lokasi	Belum diterapkan untuk validasi lokasi inspeksi gardu
5	<i>Geofencing in Location-Based Behavioral Research</i> (Shevchenko et al., 2023)	Tantangan deteksi masuk/keluar area geografis secara akurat	Studi perilaku dengan geofencing berbasis GPS	Geofencing dapat mendeteksi lokasi pengguna dengan presisi	Fokus masih pada penelitian perilaku, bukan validasi inspeksi lapangan
6	<i>Distribution Transformer Load Imbalance Analysis at Universitas Bangka</i>	Beban tidak seimbang pada trafo distribusi menyebabkan rugi energi	Pengukuran arus & rugi-rugi pada trafo distribusi selama 10 hari	Rata-rata ketidakseimbangan beban 9,91% → rugi energi tambahan	Belum dikaitkan dengan sistem validasi inspeksi

	<i>Belitung</i> (2023)				berbasis digital
7	<i>Analysis of Transformer Loading Imbalance at the Faculty of Engineering, UNTAN</i> (2024)	Ketidakseimbangan beban pada trafo menambah rugi daya	Analisis arus netral dan rugi energi pada trafo 200 kVA	Ketidakseimbangan beban dalam batas standar tapi rugi energi meningkat	Penelitian hanya analisis teknis, tanpa integrasi sistem inspeksi
8	<i>Research on the Three-Phase Load Imbalance Control of Distribution Network</i> (Guo et al., 2024)	Beban tidak seimbang meningkat karena penetrasi beban satu fasa, PV, EV	Studi strategi kompensasi & kontrol distribusi	Kontrol fasa & aliran daya dapat mengurangi dampak ketidakseimbangan beban	Fokus masih pada solusi teknis jaringan, bukan validasi inspeksi
9	<i>Intelligent Prediction of Transformer Loss for Low Voltage Distribution Networks</i> (Zhang et al., 2023)	Sulit memprediksi rugi trafo akibat ketidakseimbangan beban	Model prediksi berbasis machine learning	Model mampu memprediksi rugi-rugi dengan lebih akurat	Tidak menghubungkan prediksi rugi dengan mekanisme validasi inspeksi

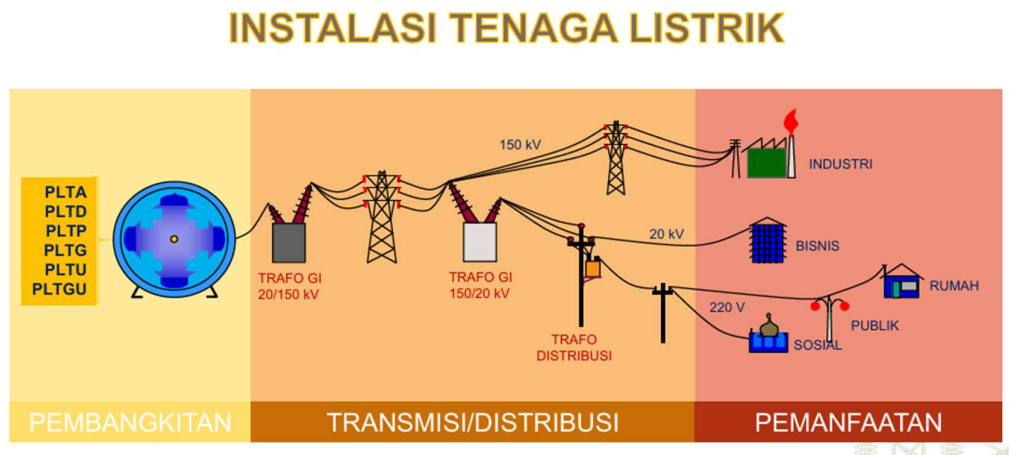
2.1.2. Gap Penelitian

Dari literatur yang ada, terlihat bahwa masing-masing teknologi validasi (NFC, QR, GPS, *geofencing*, dan validasi waktu) telah diteliti dan terbukti efektif di bidangnya masing-masing. Namun, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan seluruh teknologi tersebut secara bersamaan dalam konteks inspeksi gardu distribusi, khususnya untuk pengukuran beban dan tegangan. Penelitian ini berupaya mengisi celah tersebut dengan merancang sistem validasi berlapis: NFC sebagai mekanisme utama, QR Code sebagai cadangan, GPS & geofencing untuk validasi lokasi, serta pembatasan waktu inspeksi (LWBP dan WBP). Dengan kombinasi ini, diharapkan sistem mampu meminimalkan potensi manipulasi data sekaligus meningkatkan reliabilitas informasi kondisi gardu distribusi.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi dari gardu induk atau gardu distribusi menuju konsumen akhir. Setelah melalui tahap pembangkitan dan transmisi, tegangan tinggi dari sisi transmisi diturunkan menjadi tegangan menengah dengan menggunakan trafo daya di Gardu Induk kemudian tegangan diturunkan kembali menggunakan transformator distribusi agar sesuai dengan kebutuhan pelanggan, yaitu tegangan rendah 220/380 V [14].



Gambar 2. 1. Skema Penyaluran Tenaga Listrik

Keandalan sistem distribusi menjadi aspek penting dalam menjamin kontinuitas pasokan listrik. Indeks keandalan yang umum digunakan adalah SAIDI (System Average Interruption Duration Index) dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). Berdasarkan penelitian, pemeliharaan jaringan distribusi yang konsisten dapat menurunkan nilai SAIDI dan SAIFI secara signifikan, sehingga meningkatkan mutu pelayanan kepada pelanggan [14].

Selain itu, sistem distribusi juga menghadapi tantangan teknis berupa rugi daya, drop tegangan, serta beban tidak merata antar penyulang. Studi pada jaringan distribusi 20 kV di wilayah Pujon menunjukkan bahwa karakteristik jaringan dan variasi beban sangat memengaruhi tingkat keandalan, serta berkontribusi terhadap rugi daya listrik [15].

Pada sisi transformator distribusi, pembebanan yang melebihi kapasitas nominal dan kondisi beban tidak seimbang dapat menurunkan umur teknis trafo. Analisis pada penyulang Lowokwaru memperlihatkan bahwa peningkatan beban relatif terhadap kapasitas trafo mempercepat degradasi isolasi dan menimbulkan stres termal yang berpengaruh pada umur pakai transformator [1].

Dengan latar tersebut, validasi data inspeksi lapangan sangat diperlukan untuk memastikan data yang masuk ke basis data sistem benar-benar mencerminkan kondisi nyata. Ketidaksesuaian data berisiko menyebabkan kesalahan dalam pengambilan keputusan operasional, seperti salah perhitungan beban trafo, keterlambatan deteksi beban lebih, hingga potensi kerusakan peralatan distribusi.

2.2.2. Gardu Distribusi

a. Fungsi dan Jenis Gardu

Fungsi Gardu Distribusi



Gambar 2. 2. Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V) sehingga dapat langsung digunakan oleh konsumen. Selain itu, gardu distribusi juga berfungsi sebagai pusat pengendalian, proteksi, serta pembagian beban pada jaringan distribusi [16].

Dalam operasionalnya, gardu distribusi memiliki peran strategis, di antaranya:

1. Menjamin kontinuitas penyaluran energi listrik dengan menyesuaikan tegangan dari sisi distribusi primer ke sekunder.
2. Melindungi peralatan listrik melalui perangkat proteksi seperti fuse cut out, arrester, dan circuit breaker, yang berfungsi mengamankan trafo maupun jaringan distribusi dari gangguan hubung singkat dan tegangan lebih.
3. Membagi daya listrik secara merata ke jaringan tegangan rendah agar beban di sisi pelanggan tidak menimbulkan ketidakseimbangan.
4. Mendukung pencatatan data pengukuran seperti arus, tegangan, serta energi listrik yang menjadi dasar evaluasi kinerja sistem distribusi [3].

Jenis Gardu Distribusi

Berdasarkan konstruksi dan penempatannya, gardu distribusi dapat dibedakan menjadi beberapa jenis [17]:

1. Gardu Portal (Pole Mounted Transformer)



Gambar 2. 3. Gardu Portal

Gardu portal dipasang pada tiang distribusi dan biasanya digunakan di wilayah pedesaan atau daerah dengan kepadatan beban rendah hingga sedang. Keunggulan gardu jenis ini adalah biaya pembangunan yang relatif murah, tetapi kelemahannya adalah rentan terhadap gangguan cuaca dan lingkungan karena berada di ruang terbuka.

2. Gardu Beton (Indoor/Outdoor Substation)



Gambar 2. 4. Gardu Beton

Gardu beton dibangun secara permanen dengan konstruksi beton, umumnya ditempatkan di daerah perkotaan dengan kepadatan beban tinggi. Gardu ini lebih

terlindungi dan aman dari gangguan luar, namun membutuhkan biaya pembangunan dan lahan yang lebih besar dibanding jenis lainnya.

3. Gardu Padat (Pad Mounted Substation)



Gambar 2. 5. Gardu Padat (Pad Mounted Substation)

Gardu padat dipasang di atas pondasi tanah dengan peralatan tertutup. Jenis gardu ini banyak digunakan di kawasan industri maupun perumahan modern karena mudah diakses untuk pemeliharaan, aman dari gangguan luar, serta lebih rapi dari sisi estetika.

4. Gardu Compact



Gambar 2. 6. Gardu Compact

Gardu compact merupakan tipe gardu dengan desain ringkas, di mana seluruh komponen seperti transformator, peralatan proteksi, dan panel distribusi

ditempatkan dalam satu unit terintegrasi. Gardu ini sangat cocok digunakan di wilayah perkotaan yang memiliki keterbatasan ruang karena memberikan efisiensi lahan, tingkat keamanan lebih baik, serta tampilan yang mendukung tata kota [17].

b. Komponen Utama Gardu Distribusi

Gardu distribusi terdiri dari beberapa komponen penting yang berfungsi secara terpadu untuk menyalurkan energi listrik dari jaringan tegangan menengah ke konsumen tegangan rendah. Komponen yang terdapat pada gardu tidak hanya berperan dalam proses penyaluran daya, tetapi juga melindungi sistem dari gangguan, menjaga kualitas daya, serta menjamin keselamatan kerja.

Komponen yang paling utama adalah transformator distribusi, yang berfungsi menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 220/380 V. Transformator distribusi merupakan perangkat vital karena menentukan kapasitas penyaluran daya pada suatu wilayah serta berpengaruh langsung terhadap kualitas tegangan yang diterima pelanggan. Beban berlebih (*overload*) dan ketidakseimbangan beban (*unbalance*) pada trafo dapat mempercepat kerusakan isolasi, menurunkan umur peralatan, dan menimbulkan rugi daya yang signifikan [18].

Selain transformator, gardu distribusi juga dilengkapi dengan peralatan proteksi. Peralatan ini meliputi *fuse cut out*, *lightning arrester*, *miniature circuit breaker* (MCB), *moulded case circuit breaker* (MCCB), serta relai proteksi lainnya. Peralatan tersebut berfungsi untuk melindungi trafo maupun jaringan distribusi dari gangguan arus lebih, hubung singkat, dan tegangan lebih akibat sambaran petir. Keberadaan arrester khususnya sangat penting dalam mereduksi dampak tegangan transien akibat petir yang bisa merusak peralatan [3].



Gambar 2. 7. PHB-TR

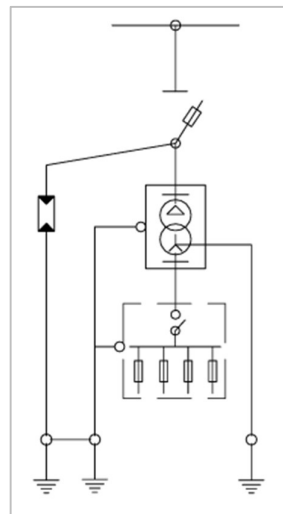
Komponen lain yang tidak kalah penting adalah panel hubung bagi (PHB) atau panel distribusi tegangan rendah. Panel ini digunakan untuk mengatur pembagian daya listrik kepada pelanggan, dilengkapi dengan peralatan pengukuran seperti kWh meter, *current transformer* (CT), dan *voltage transformer* (VT). Keberadaan perangkat pengukuran memungkinkan PLN untuk melakukan pencatatan energi serta pemantauan kondisi beban secara lebih akurat [17].

Selain itu, gardu distribusi juga dilengkapi dengan sistem pentanahan yang berfungsi melindungi peralatan dan manusia dari potensi bahaya tegangan lebih. Pentanahan diterapkan pada titik netral transformator, arrester, serta body peralatan untuk memastikan keselamatan operasi. Berdasarkan Buku 4 PLN – Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik, nilai tahanan pentanahan pada gardu distribusi disyaratkan $\leq 5 \Omega$ agar fungsi proteksi dapat berjalan dengan baik [19].

Dengan adanya komponen-komponen utama tersebut, gardu distribusi tidak hanya berperan dalam menyalurkan energi listrik, tetapi juga menjamin kualitas dan keandalan pasokan serta keamanan operasi sistem distribusi.

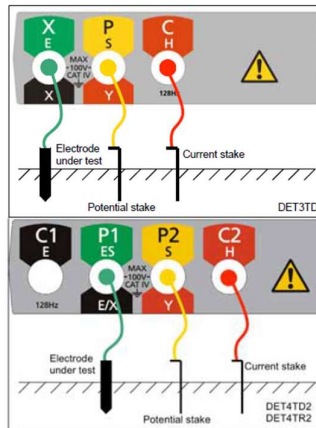
c. Sistem Pentanahan pada Gardu Distribusi

Sistem pentanahan merupakan salah satu komponen penting pada gardu distribusi yang berfungsi untuk menjamin keselamatan peralatan dan manusia dari potensi bahaya tegangan lebih. Melalui sistem ini, arus gangguan atau lonjakan tegangan akibat petir maupun hubung singkat dapat dialirkan ke tanah sehingga tidak merusak peralatan atau membahayakan petugas di lapangan.



Gambar 2. 8. Diagram Satu Garis Gardu Portal

Pentanahan pada gardu distribusi umumnya dipasang pada beberapa titik, antara lain pada netral transformator, arrester, dan body peralatan. Netral transformator ditanahkan untuk memastikan adanya titik referensi tegangan nol sehingga tegangan fase tetap stabil. *Arrester* ditanahkan agar arus akibat sambaran petir dapat segera dialirkan ke tanah, sementara pentanahan body peralatan digunakan untuk menghindari tegangan sentuh yang berbahaya bagi manusia.



Gambar 2. 9. Panduan Pengukuran Tahanan Pentanahan

Menurut PUIL 2011, setiap instalasi tenaga listrik wajib dilengkapi dengan sistem pentanahan yang memadai guna mendukung fungsi proteksi. Walaupun tidak secara spesifik menetapkan nilai tahanan pentanahan, PUIL menekankan bahwa sistem ini harus dipasang sesuai ketentuan agar keselamatan tetap terjamin. Sementara itu, dalam Buku 4 PLN – Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik, dinyatakan bahwa nilai tahanan pentanahan gardu distribusi harus kurang dari 5Ω untuk memastikan sistem proteksi bekerja efektif dan aman [19].

Oleh karena itu, kualitas pentanahan harus diperhatikan secara serius dalam setiap pembangunan maupun inspeksi gardu distribusi. Nilai tahanan yang tinggi dapat menyebabkan arrester tidak bekerja optimal saat terjadi lonjakan tegangan, atau pengaman gagal berfungsi pada saat hubung singkat ke tanah. Dengan pemeliharaan dan pengukuran berkala, diharapkan nilai tahanan pentanahan tetap sesuai standar sehingga fungsi proteksi dapat berjalan dengan baik dan keandalan sistem distribusi tetap terjaga.

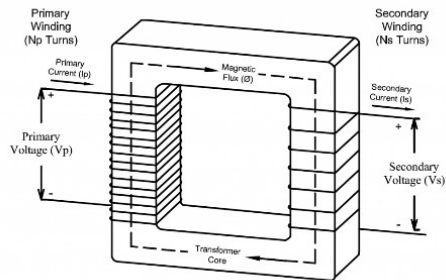
2.2.3. Beban dan Tegangan pada Trafo Distribusi

Transformator distribusi merupakan peralatan inti dalam sistem distribusi tenaga listrik yang bertugas menurunkan tegangan dari jaringan menengah (20 kV) ke tegangan rendah (220/380 V) agar dapat dimanfaatkan oleh konsumen. Dalam operasionalnya, terdapat tiga aspek penting yang harus selalu dipantau, yaitu kondisi transformator itu

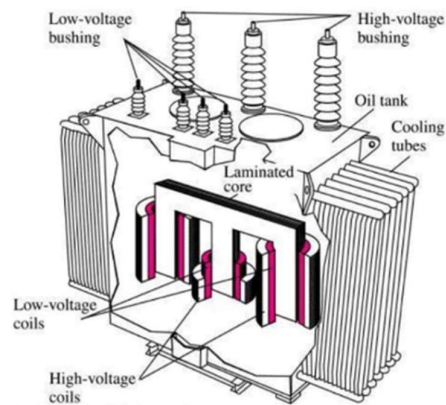
sendiri, besar beban yang disalurkan, serta kestabilan tegangannya. Ketiga hal ini sangat menentukan mutu penyaluran energi listrik dan kualitas daya yang diterima pelanggan.

a. Trafo Distribusi

Transformator distribusi merupakan peralatan listrik yang ditempatkan di gardu distribusi untuk menurunkan tegangan dari jaringan menengah, umumnya 20 kV, menjadi tegangan rendah 220/380 V yang dapat digunakan langsung oleh konsumen. Trafo jenis ini berfungsi sebagai penghubung utama antara jaringan distribusi dan beban pelanggan, sehingga keberadaannya sangat menentukan keandalan pasokan energi listrik.



Gambar 2. 10. Fluks pada Transformator



Gambar 2. 11. Bagian Trafo Distribusi

Secara umum, kapasitas trafo distribusi yang digunakan oleh PLN bervariasi antara 25 kVA hingga 2.500 kVA, disesuaikan dengan jumlah pelanggan dan kebutuhan beban pada suatu wilayah. Dari sisi konstruksi, trafo distribusi terdiri atas

inti (*core*) yang berfungsi sebagai jalur fluks magnet, lilitan primer dan sekunder (*windings*) yang dibungkus isolasi, serta media pendingin berupa minyak isolasi untuk menjaga kestabilan suhu operasi. Pada beberapa trafo modern juga dilengkapi dengan pendinginan tambahan dan sistem proteksi internal.

Kinerja trafo distribusi dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti kondisi lingkungan (suhu, kelembaban, polusi udara), kualitas pemeliharaan, serta kualitas bahan isolasi yang digunakan. Apabila faktor-faktor ini tidak dikelola dengan baik, maka trafo dapat mengalami penurunan performa yang berakibat pada berkurangnya umur pakai. Oleh karena itu, monitoring berkala terhadap kondisi fisik dan parameter operasi trafo menjadi aspek penting dalam manajemen aset distribusi [16].

Dengan peran vital tersebut, trafo distribusi sering dianggap sebagai titik krusial dalam menjaga kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Ketersediaan data yang akurat mengenai kondisi trafo sangat diperlukan agar langkah-langkah preventif maupun korektif dapat dilakukan tepat waktu. Hal ini menjadi dasar penting bagi penelitian yang berfokus pada validasi data inspeksi trafo distribusi.

b. Beban Trafo Distribusi

Beban transformator distribusi adalah total daya listrik yang disalurkan ke pelanggan melalui jaringan tegangan rendah. Beban ini dipengaruhi oleh jumlah konsumen, jenis peralatan listrik yang digunakan, serta pola pemakaian energi pada periode tertentu, seperti waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP). Dalam operasionalnya, pengelolaan beban sangat penting karena memengaruhi efisiensi penyaluran, umur pakai transformator, dan kualitas pelayanan kepada pelanggan.

Trafo distribusi memiliki kapasitas nominal (kVA) yang menjadi batas maksimum beban yang dapat ditanggung tanpa menimbulkan gangguan. Apabila arus beban yang mengalir melebihi kapasitas nominal, maka terjadi beban lebih (*overload*). Kondisi *overload* menimbulkan kenaikan temperatur lilitan dan minyak isolasi, yang apabila berlangsung lama dapat mempercepat degradasi isolasi serta menurunkan umur pakai trafo. Penelitian menunjukkan bahwa pengoperasian transformator secara

terus-menerus di atas 80% dari kapasitas nominal akan mempercepat laju penuaan isolasi sehingga berpengaruh signifikan terhadap residual life trafo [18].

Selain *overload*, pola beban juga berpengaruh signifikan terhadap kinerja transformator. Fluktuasi beban harian yang tajam dapat menimbulkan siklus pemanasan dan pendinginan berulang (*thermal cycling*) yang menyebabkan tegangan mekanis pada lilitan serta mempercepat degradasi isolasi. Kondisi ini membuat transformator lebih rentan terhadap gangguan meskipun beban rata-rata tidak melebihi kapasitas nominal [16].

Selain itu, keberadaan beban non-linier, misalnya dari peralatan berbasis elektronika daya seperti komputer, peralatan rumah tangga modern, hingga *inverter*, dapat menghasilkan arus harmonisa. Arus harmonisa ini meningkatkan rugi-rugi tambahan (*stray losses*) dan menimbulkan pemanasan berlebih pada inti maupun gulungan transformator. Dampaknya, transformator bisa mengalami penurunan efisiensi dan percepatan penuaan meskipun secara perhitungan beban masih berada dalam batas normal [18].

Untuk itu, pemantauan beban trafo distribusi secara berkala diperlukan agar kondisi operasi tetap dalam batas aman. PLN biasanya melakukan pencatatan beban harian dan bulanan, termasuk perbandingan antara beban puncak dengan kapasitas trafo. Data ini tidak hanya berfungsi sebagai dasar evaluasi kinerja trafo, tetapi juga menjadi acuan dalam menentukan tindakan seperti redistribusi beban, penggantian trafo dengan kapasitas lebih besar, atau pemasangan trafo tambahan pada wilayah dengan pertumbuhan konsumsi listrik yang tinggi [16].

Dengan demikian, validitas data hasil inspeksi beban menjadi sangat penting. Data yang tidak akurat dapat menimbulkan kesalahan dalam pengambilan keputusan, misalnya menganggap trafo masih beroperasi normal padahal sebenarnya sudah dalam kondisi *overload*. Oleh karena itu, penelitian mengenai sistem validasi data inspeksi memiliki kontribusi langsung terhadap pengelolaan beban trafo distribusi agar lebih efektif dan andal.

Contoh Kasus Lapangan

Kasus beban non-linier dan harmonisa pada trafo distribusi pernah ditemukan di beberapa wilayah operasional PLN. Misalnya, pada kawasan komersial dengan dominasi beban elektronika daya seperti pusat perbelanjaan, kantor, dan gedung perkantoran modern. Beban-beban ini menimbulkan arus harmonisa yang signifikan, sehingga transformator mengalami pemanasan berlebih walaupun arus beban rata-rata masih dalam kapasitas nominal.

Hasil pengukuran yang dilakukan dalam studi oleh Pirniawan [18] menunjukkan bahwa peningkatan kandungan harmonisa pada arus dapat menyebabkan kerugian tambahan (*stray losses*) hingga beberapa persen dari daya nominal transformator. Kondisi ini berpengaruh langsung pada kenaikan temperatur lilitan dan minyak isolasi, yang pada akhirnya mempercepat degradasi isolasi serta menurunkan umur transformator.

Kasus lain yang sering dijumpai di unit layanan PLN adalah pada kawasan pemukiman padat, di mana fluktuasi beban harian cukup tajam. Pada pagi dan malam hari, beban meningkat drastis akibat penggunaan peralatan rumah tangga secara bersamaan. Hal ini memicu siklus pemanasan dan pendinginan yang berulang (*thermal cycling*) sehingga meningkatkan tegangan mekanis pada lilitan. Studi yang dilakukan di Gardu Induk Serang [16] memperlihatkan bahwa kondisi seperti ini dapat memperbesar risiko gangguan jika tidak ditangani dengan redistribusi beban atau penggantian trafo dengan kapasitas lebih besar.

Dari kasus-kasus tersebut dapat dilihat bahwa permasalahan beban trafo distribusi bukan hanya disebabkan oleh *overload*, tetapi juga oleh karakteristik pola konsumsi dan jenis beban pelanggan. Oleh sebab itu, validasi data hasil inspeksi beban, termasuk pencatatan arus tiap fasa dan indikasi adanya harmonisa, menjadi sangat penting agar tindakan pencegahan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan serius pada transformator.

c. Tegangan Trafo Distribusi

Transformator distribusi tidak hanya berfungsi menyalurkan daya listrik, tetapi juga menjaga agar tegangan yang diterima pelanggan tetap berada dalam batas standar

yang telah ditetapkan. Tegangan ini menjadi salah satu parameter utama kualitas daya, sebab penyimpangan nilai tegangan dapat mengakibatkan gangguan pada peralatan listrik pelanggan, menurunkan efisiensi operasi, bahkan memperpendek umur pakai peralatan.

Tabel 2. 2. Sistem Arus Bolak-Balik yang Diterapkan pada Sistem Distribusi TR

1.a. Sistem fase-tiga empat-kawat
Tegangan Nominal (V)
230 / 400
1.b. Sistem fase-tunggal tiga-kawat
Tegangan Nominal (V)
2 x 230
Sistem fase-tunggal tiga kawat tidak dikembangkan

Berdasarkan [20], sistem distribusi tegangan rendah PLN umumnya menggunakan konfigurasi tiga fasa empat kawat dengan tegangan nominal 230/400 V. Dokumen ini juga mengatur batas variasi tegangan, yaitu:

- **Julat tegangan pelayanan normal:** $\pm 10\%$ dari tegangan nominal.
- **Julat tegangan pemanfaatan:** $+10\%$ hingga -15% dari tegangan nominal, dengan mempertimbangkan adanya jatuh tegangan pada instalasi konsumen yang dibatasi hingga 5% (4% menurut IEC) [20].

Tabel 2. 3. Julat Tegangan Distribusi Tegangan Rendah

Parameter	Tegangan Nominal	Julat Tegangan Normal ($\pm 10\%$)	Julat Tegangan Pemanfaatan ($+10\%, -15\%$)
Tegangan Fasa-Netral	230 V	207 V – 253 V	195,5 V – 253 V
Tegangan Antar Fasa	400 V	360 V – 440 V	340 V – 440 V

Dengan acuan tersebut, tegangan keluaran transformator distribusi di sisi sekunder harus berada dalam kisaran:

- **Tegangan fasa–netral:** 207 V – 253 V (normal), 195,5 V – 253 V (pemanfaatan).
- **Tegangan antar fasa:** 360 V – 440 V (normal), 340 V – 440 V (pemanfaatan).

Dalam praktiknya, tegangan pada sisi sekunder trafo distribusi sering mengalami fluktuasi akibat panjang saluran, variasi pola beban, maupun pembagian beban yang tidak seimbang. Salah satu masalah yang umum adalah drop tegangan, terutama pada pelanggan yang berada jauh dari gardu distribusi atau saat beban puncak. Tegangan rendah yang berada di luar batas pemanfaatan menyebabkan peralatan pelanggan tidak bekerja optimal, bahkan dapat menimbulkan kerusakan [16].

Walaupun pembahasan lebih detail mengenai dampak ketidakseimbangan akan dijelaskan pada Bagian 2.1.4, hal ini menunjukkan bahwa tegangan dan beban saling berkaitan erat dalam memengaruhi kinerja trafo distribusi.

Untuk mengantisipasi masalah kualitas tegangan, PLN biasanya melakukan pengaturan *tap changer* pada transformator agar tegangan keluaran tetap sesuai standar meskipun terjadi variasi beban. Selain itu, inspeksi rutin dan validasi data hasil pengukuran tegangan diperlukan untuk memastikan bahwa kondisi lapangan sesuai dengan data pencatatan. Data tegangan yang valid menjadi dasar dalam pengambilan keputusan teknis, seperti penambahan kapasitas trafo, redistribusi beban, atau perbaikan jaringan [18].

2.2.4. Ketidakseimbangan Beban dan Dampaknya

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, kondisi ideal yang diharapkan adalah pembagian beban yang merata pada setiap fasa transformator distribusi. Dengan pembagian yang seimbang, arus netral akan bernilai nol, rugi-rugi daya dapat ditekan, dan kualitas tegangan yang diterima pelanggan tetap terjaga. Namun, dalam kenyataannya, kondisi di lapangan sering jauh dari ideal. Beban pelanggan biasanya tidak merata, terutama karena sebagian besar konsumen menggunakan sambungan satu fasa.

Akibatnya, arus yang mengalir pada masing-masing fasa berbeda-beda, sehingga menimbulkan kondisi yang dikenal sebagai ketidakseimbangan beban (*unbalance load*).

Ketidakseimbangan beban merupakan salah satu permasalahan klasik pada jaringan distribusi yang jika tidak ditangani dengan baik dapat berdampak serius terhadap keandalan transformator maupun kualitas pelayanan listrik kepada pelanggan. Oleh karena itu, penting untuk memahami definisi, penyebab, serta dampak teknis dan operasional dari ketidakseimbangan beban, termasuk standar batas yang diperbolehkan serta bagaimana validasi data inspeksi dapat membantu mengantisipasinya.

a. Definisi Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban (*unbalance load*) pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa terjadi apabila arus atau tegangan pada masing-masing fasa tidak sama besar. Dalam kondisi ideal, arus pada fasa R, S, dan T harus seimbang sehingga arus yang mengalir pada konduktor netral mendekati nol. Namun, pada kenyataannya, pembagian beban pelanggan tidak selalu merata, terutama karena sebagian besar konsumen rumah tangga dan komersial kecil menggunakan sambungan satu fasa. Kondisi ini mengakibatkan salah satu atau dua fasa menanggung arus lebih besar dibandingkan fasa lainnya.

Parameter ini digunakan untuk mengukur sejauh mana perbedaan arus antar fasa, sehingga dapat menjadi indikator awal dalam menilai tingkat keparahan ketidakseimbangan beban [21].

Selain arus, ketidakseimbangan juga dapat diukur dari sisi tegangan. Menurut standar [22], ketidakseimbangan tegangan pada sistem distribusi didefinisikan sebagai rasio antara komponen negatif urutan (*negative sequence component*) terhadap komponen positif urutan (*positive sequence component*) dalam sistem tiga fasa. Nilai ini dinyatakan dalam persentase, dengan batas maksimum yang diperbolehkan umumnya tidak lebih dari 20%.

Dengan demikian, ketidakseimbangan beban merupakan parameter penting yang harus diperhatikan dalam inspeksi gardu distribusi. Nilai persentase ketidakseimbangan beban yang melebihi standar dapat menimbulkan kerugian teknis

maupun operasional, sehingga pemantauan dan validasi hasil pengukuran beban menjadi langkah krusial dalam menjaga keandalan sistem distribusi.

b. Penyebab Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi umumnya disebabkan oleh beberapa faktor yang berkaitan dengan kondisi jaringan maupun karakteristik pelanggan. Faktor-faktor utama penyebab ketidakseimbangan beban antara lain:

Pembagian Beban Pelanggan Tidak Merata

Pada jaringan distribusi tegangan rendah, sebagian besar pelanggan rumah tangga dan komersial kecil menggunakan sambungan satu fasa. Secara ideal, sambungan tersebut harus didistribusikan secara merata ke fasa R, S, dan T agar transformator beroperasi seimbang. Namun dalam praktiknya, sering terjadi konsentrasi sambungan pada salah satu fasa karena berbagai alasan, seperti kemudahan teknis pemasangan, keterbatasan informasi petugas lapangan, maupun kurangnya monitoring beban secara berkala.

Ketidakseimbangan ini biasanya muncul secara bertahap. Misalnya, pada saat awal pemasangan trafo distribusi, pembagian fasa dilakukan cukup merata. Namun, seiring waktu, penambahan pelanggan baru cenderung disambungkan ke fasa yang secara fisik lebih mudah dijangkau. Akumulasi pemasangan semacam ini menyebabkan salah satu fasa menanggung arus lebih besar dibandingkan fasa lainnya. Studi lapangan menunjukkan bahwa distribusi beban satu fasa yang tidak terkendali merupakan penyumbang utama terjadinya ketidakseimbangan beban pada jaringan distribusi [16].

Selain faktor teknis pemasangan, terdapat pula faktor administratif. Kesalahan pencatatan fasa pelanggan di basis data dapat menyebabkan perencanaan redistribusi beban tidak akurat. Dalam beberapa kasus, pelanggan tercatat terhubung pada fasa tertentu, padahal sambungan aktual di lapangan berbeda. Hal ini memperburuk ketidakseimbangan karena redistribusi tidak dapat dilakukan dengan tepat [18].

Dengan demikian, pembagian beban pelanggan yang tidak merata merupakan penyebab utama ketidakseimbangan beban. Faktor ini menegaskan pentingnya

inspeksi lapangan yang tervalidasi, sehingga data fasa pelanggan benar-benar sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

Pertumbuhan Konsumsi Listrik yang Tidak Diikuti Redistribusi

Pertumbuhan jumlah pelanggan dan peningkatan daya terpasang merupakan faktor penting yang berkontribusi terhadap ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi. Pada saat awal operasi, pembagian beban biasanya masih relatif seimbang. Namun, seiring waktu, terjadi penambahan pelanggan baru yang tidak selalu memperhatikan kondisi distribusi beban pada masing-masing fasa.

Fenomena ini sering dijumpai pada wilayah dengan pertumbuhan penduduk yang cepat atau kawasan yang sedang berkembang, seperti perumahan baru, area komersial, maupun klaster industri kecil. Pelanggan tambahan cenderung disambungkan ke fasa yang paling mudah dijangkau secara fisik, tanpa memperhatikan keseimbangan total beban. Akibatnya, satu atau dua fasa mengalami penambahan beban yang lebih signifikan dibandingkan fasa lainnya [16].

Selain itu, peningkatan daya pelanggan yang sudah ada, misalnya dari 900 VA menjadi 2200 VA atau lebih, juga dapat memperburuk ketidakseimbangan apabila tidak diikuti dengan redistribusi beban. Kenaikan daya ini menambah arus pada fasa tertentu secara signifikan, sementara kondisi fasa lainnya tidak berubah. Hal ini terbukti pada beberapa studi kasus, di mana redistribusi beban yang tidak dilakukan secara rutin menyebabkan arus antar fasa semakin jauh berbeda [18].

Dengan demikian, pertumbuhan konsumsi listrik yang tidak diimbangi dengan upaya redistribusi beban secara berkala menjadi salah satu penyebab utama terjadinya ketidakseimbangan. Oleh karena itu, pemantauan beban melalui inspeksi lapangan yang tervalidasi sangat penting, agar kondisi ketidakseimbangan dapat terdeteksi lebih dini dan tindakan korektif dapat dilakukan sebelum masalah berkembang lebih jauh.

Kondisi Netral yang Buruk

Konduktor netral merupakan bagian penting pada sistem distribusi tiga fasa empat penghantar, karena berfungsi menyalurkan arus balik dari beban satu fasa dan menjaga kestabilan tegangan antar fasa. Dalam kondisi normal, arus pada konduktor

netral seharusnya relatif kecil apabila beban terdistribusi seimbang. Namun, apabila terjadi masalah pada konduktor netral, baik karena sambungan yang longgar, korosi, kerusakan mekanis, atau ukuran penghantar yang tidak sesuai standar, maka kestabilan sistem akan terganggu.

Kondisi netral yang buruk menyebabkan arus balik dari beban satu fasa tidak dapat mengalir dengan baik. Hal ini mengakibatkan ketidakseimbangan distribusi arus antar fasa menjadi semakin besar, walaupun sebenarnya pembagian beban pelanggan tidak terlalu jauh berbeda. Selain itu, resistansi tambahan akibat koneksi netral yang tidak sempurna juga dapat menimbulkan variasi tegangan antar fasa [21].

Studi menunjukkan bahwa banyak kasus ketidakseimbangan beban di lapangan tidak hanya disebabkan oleh distribusi pelanggan yang tidak merata, tetapi juga diperparah oleh kualitas sambungan netral yang kurang baik. Perbaikan sederhana seperti pengencangan sambungan netral, penggunaan material konduktor sesuai standar, atau perawatan berkala terbukti mampu mengurangi tingkat ketidakseimbangan arus pada transformator distribusi [22].

Dengan demikian, kualitas netral memegang peranan penting dalam kestabilan sistem distribusi. Inspeksi lapangan yang dilengkapi dengan validasi data sangat diperlukan untuk memastikan bahwa kondisi netral selalu dalam keadaan baik dan sesuai standar teknis.

Dominasi Beban Non – Linier

Selain faktor distribusi pelanggan dan kondisi infrastruktur jaringan, ketidakseimbangan beban juga dapat disebabkan oleh dominasi beban non-linier pada sistem distribusi. Beban non-linier adalah jenis beban listrik yang arusnya tidak sebanding dengan tegangan sinusoidal yang diberikan. Contoh umum dari beban ini adalah komputer, perangkat elektronik rumah tangga berbasis *switching power supply*, peralatan industri berbasis *inverter*, hingga pengisi daya kendaraan listrik.

Arus yang ditarik oleh beban non-linier mengandung komponen harmonisa yang dapat berbeda antar fasa, sehingga menimbulkan ketidakseimbangan meskipun beban total terlihat serupa. Misalnya, satu fasa yang didominasi beban inverter dapat

menghasilkan distorsi arus yang lebih besar dibandingkan fasa lain yang lebih linear. Kondisi ini memperburuk asimetri arus antar fasa, sehingga memicu ketidakseimbangan beban [22].

Fenomena ini semakin relevan dengan meningkatnya penetrasi perangkat berbasis elektronika daya dalam jaringan distribusi modern. Studi terbaru menunjukkan bahwa di daerah perkotaan, persentase harmonisa akibat beban non-linier dapat mencapai lebih dari 20% dari arus total, dan distribusi yang tidak merata antar fasa menjadikan kondisi ketidakseimbangan semakin nyata [16].

Oleh karena itu, dominasi beban non-linier menjadi salah satu faktor penting penyebab ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi, terutama di jaringan perkotaan dan kawasan dengan adopsi tinggi perangkat elektronik modern. Monitoring lapangan yang tervalidasi menjadi langkah kunci untuk mengidentifikasi kontribusi beban non-linier terhadap ketidakseimbangan beban, sehingga langkah korektif dapat dilakukan dengan tepat.

c. Dampak Teknis pada Transformator

Transformator distribusi dirancang untuk bekerja dalam kondisi beban yang relatif seimbang pada ketiga fasanya. Keseimbangan ini penting karena memengaruhi aliran arus, stabilitas tegangan, serta rugi-rugi energi yang timbul selama operasi. Apabila terjadi ketidakseimbangan beban, maka distribusi arus antar fasa menjadi tidak merata sehingga menimbulkan konsekuensi teknis pada transformator.

Dalam jangka pendek, ketidakseimbangan dapat menyebabkan peningkatan arus pada konduktor netral dan menurunkan kualitas tegangan pada sisi sekunder. Sementara dalam jangka panjang, kondisi ini memicu akumulasi panas berlebih pada lilitan tertentu, meningkatkan rugi-rugi daya, dan mempercepat degradasi isolasi transformator. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban memiliki efek yang setara, bahkan dalam beberapa kasus lebih merugikan dibandingkan kondisi beban lebih (*overload*) yang simetris [18].

Oleh karena itu, pemahaman mengenai dampak teknis dari ketidakseimbangan beban sangat penting sebagai dasar dalam perencanaan pemeliharaan maupun dalam

menentukan strategi redistribusi beban. Bagian ini membahas secara rinci dampak teknis yang ditimbulkan oleh kondisi beban tidak seimbang pada transformator distribusi.

Setelah memahami bahwa ketidakseimbangan beban menimbulkan konsekuensi serius bagi transformator distribusi, penting untuk menguraikan lebih detail bentuk-bentuk gangguan teknis yang ditimbulkan. Dampak teknis ini dapat diamati melalui beberapa aspek utama, mulai dari arus netral yang meningkat, distribusi panas yang tidak merata pada lilitan, hingga bertambahnya rugi-rugi energi dan penurunan kualitas tegangan. Berikut adalah beberapa dampak teknis utama akibat ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi.

Peningkatan Arus Netral

Dalam sistem distribusi tiga fasa empat kawat, konduktor netral berfungsi menyalurkan arus balik dari beban satu fasa. Pada kondisi ideal, ketika arus ketiga fasa seimbang, arus yang mengalir pada netral relatif kecil bahkan mendekati nol. Namun, ketika terjadi ketidakseimbangan beban, arus fasa yang berbeda menyebabkan arus netral meningkat signifikan.

Arus netral yang tinggi menimbulkan dua konsekuensi utama. Pertama, konduktor netral itu sendiri mengalami rugi-rugi tembaga (I^2R losses) yang lebih besar, sehingga memicu pemanasan berlebih pada penghantar netral. Kedua, arus netral yang besar dapat menyebabkan penurunan tegangan (*voltage drop*) pada sisi netral, yang pada gilirannya memengaruhi kestabilan tegangan antar fasa [21].

Penelitian terbaru menegaskan bahwa ketidakseimbangan beban, terutama bila disertai adanya harmonisa dari beban non-linier, dapat meningkatkan arus netral hingga mencapai nilai mendekati arus fasa. Kondisi ini berdampak langsung pada peningkatan rugi-rugi energi pada transformator dan menurunkan efisiensi distribusi tenaga listrik [2].

Dengan demikian, peningkatan arus netral merupakan salah satu indikator teknis paling jelas dari adanya ketidakseimbangan beban. Oleh karena itu, pemantauan arus netral secara rutin melalui inspeksi lapangan yang tervalidasi menjadi langkah

penting untuk mendeteksi lebih dini potensi permasalahan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi.

Pemanasan Berlebih pada Lilitan Transformator

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi berimplikasi langsung pada kondisi termal lilitan. Pada kondisi normal, arus yang mengalir melalui masing-masing lilitan relatif sama sehingga distribusi panas cenderung merata. Namun, ketika terjadi ketidakseimbangan, satu atau lebih fasa menanggung arus berlebih dibandingkan fasa lainnya. Kondisi ini menimbulkan pemanasan lokal (*hot spot*) pada lilitan tertentu, yang sering kali tidak terdeteksi hanya dengan mengukur suhu rata-rata minyak transformator.

Secara teknis, ketidakseimbangan beban menghasilkan komponen arus urutan negatif (*negative sequence current*) yang menimbulkan fluks magnet berlawanan dengan fluks utama. Kehadiran fluks ini memicu rugi-rugi tambahan pada inti serta meningkatkan arus sirkulasi di dalam lilitan. Akibatnya, panas tidak hanya terakumulasi di gulungan fasa dengan arus lebih besar, tetapi juga menyebar ke bagian lain dari transformator [23].

Apabila pemanasan berlebih berlangsung secara terus-menerus, material isolasi padat (kertas selulosa) dan cair (minyak trafo) akan mengalami percepatan degradasi. Penurunan kualitas isolasi menyebabkan titik tembus dielektrik berkurang, sehingga risiko *breakdown* meningkat. Studi menunjukkan bahwa umur isolasi dapat menurun hingga 30–40% apabila transformator secara konsisten beroperasi dengan tingkat ketidakseimbangan melebihi 10% [18].

Temuan ini sejalan dengan standar internasional. IEC 60076-7 menjelaskan bahwa laju penuaan isolasi kira-kira berlipat ganda untuk setiap kenaikan suhu titik panas sebesar 6–8 °C di atas nilai referensi 98 °C [24]. Sementara itu, IEEE C57.91-2011 menegaskan bahwa transformator dengan desain suhu titik panas 110 °C hanya akan memiliki 50% umur normal jika beroperasi pada 118 °C, dan sekitar 25% umur normal jika pada 126 °C [25].

Kasus nyata di beberapa jaringan distribusi menunjukkan bahwa transformator dengan arus fasa tidak seimbang cenderung lebih cepat mengalami gangguan termal. Hal ini ditandai dengan lonjakan suhu minyak, keluarnya gas akibat degradasi minyak, hingga terpicunya sistem proteksi akibat suhu berlebih. Dengan demikian, meskipun daya rata-rata yang ditanggung masih di bawah kapasitas nominal, ketidakseimbangan tetap dapat menimbulkan kondisi kritis pada trafo [2].

Oleh karena itu, pemantauan kondisi termal harus memperhatikan tidak hanya kapasitas beban rata-rata, tetapi juga tingkat ketidakseimbangan antar fasa. Validasi data inspeksi lapangan yang mencakup pengukuran arus tiap fasa menjadi langkah penting untuk mencegah pemanasan berlebih dan memperpanjang umur transformator distribusi.

Peningkatan Rugi-Rugi Daya

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi tidak hanya menimbulkan masalah termal, tetapi juga meningkatkan rugi-rugi energi yang terjadi di dalam transformator. Pada kondisi beban seimbang, rugi-rugi utama terdiri dari rugi-rugi tembaga (I^2R losses) pada lilitan dan rugi-rugi inti (*core losses*) akibat histeresis serta arus eddy. Namun, ketika terjadi ketidakseimbangan, muncul rugi-rugi tambahan yang memperburuk efisiensi transformator.

Salah satu penyebab utama adalah meningkatnya arus urutan negatif yang mengalir pada lilitan, sehingga menghasilkan rugi-rugi tambahan pada konduktor maupun inti besi. Selain itu, ketidakseimbangan beban sering kali disertai oleh dominasi beban non-linier yang memunculkan harmonisa. Kombinasi ketidakseimbangan dan harmonisa memperbesar *stray losses* seperti rugi arus eddy pada bagian struktural transformator [2].

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan bisa lebih signifikan dibandingkan kondisi overload ringan dengan beban seimbang. Sebagai contoh, simulasi dan uji lapangan [23] memperlihatkan bahwa kondisi beban tidak seimbang dapat meningkatkan rugi-rugi transformator hingga 10–15% dibandingkan kondisi nominal. Hal ini terjadi karena arus netral yang

tinggi menambah rugi-rugi pada konduktor netral, sementara arus harmonisa memperbesar kerugian tambahan di inti dan belitan.

Dengan demikian, peningkatan rugi-rugi daya merupakan konsekuensi teknis penting dari ketidakseimbangan beban. Selain mengurangi efisiensi energi, kondisi ini juga mempercepat penuaan transformator karena rugi-rugi yang lebih tinggi dikonversikan menjadi panas tambahan. Oleh karena itu, pemantauan nilai rugi-rugi akibat ketidakseimbangan beban perlu dijadikan salah satu parameter penting dalam evaluasi kondisi transformator distribusi.

Distorsi Tegangan pada Sisi Sekunder

Selain meningkatkan rugi-rugi dan menyebabkan pemanasan berlebih, ketidakseimbangan beban juga berdampak pada kualitas tegangan keluaran transformator. Pada kondisi seimbang, tegangan antar fasa dan tegangan fasa-ke-netral relatif stabil sesuai dengan standar nominal sistem distribusi, misalnya 230/400 V untuk sistem tegangan rendah. Namun, ketika beban tidak merata, fasa dengan arus yang lebih besar cenderung mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*) lebih signifikan dibandingkan fasa lain, sehingga mengakibatkan distorsi tegangan pada sisi sekunder.

Distorsi tegangan ini dapat berupa deviasi tegangan antar fasa, tegangan netral yang bergeser, maupun fluktuasi tegangan sesaat. Kondisi tersebut tidak hanya mengganggu kestabilan sistem, tetapi juga dapat menurunkan kinerja peralatan listrik yang terhubung. Misalnya, peralatan motor induksi lebih sensitif terhadap variasi tegangan antar fasa, sehingga akan bekerja pada kondisi torsi yang tidak stabil ketika ketidakseimbangan beban terjadi [26].

Lebih jauh, penelitian terkini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban yang disertai harmonisa dapat memperparah distorsi tegangan pada sisi sekunder. [2] menegaskan bahwa beban non-linier pada satu atau dua fasa menyebabkan bentuk gelombang tegangan semakin terdistorsi, yang berimplikasi pada kualitas daya (*power quality*) secara keseluruhan.

Distorsi tegangan ini, jika tidak terkendali, tidak hanya menurunkan efisiensi operasi transformator, tetapi juga berdampak pada penurunan umur peralatan pelanggan akibat bekerja dalam kondisi tegangan yang tidak sesuai standar. Oleh karena itu, inspeksi lapangan yang tervalidasi harus mencakup pengukuran tegangan antar fasa dan fasa-ke-netral, sehingga distorsi akibat ketidakseimbangan dapat terdeteksi sejak dini.

d. Dampak Operasional dan Keandalan Sistem

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi tidak hanya menimbulkan konsekuensi teknis pada peralatan, tetapi juga berdampak lebih luas pada aspek operasional dan keandalan sistem tenaga listrik. Dalam konteks operasional, ketidakseimbangan beban mempengaruhi efisiensi jaringan, meningkatkan potensi gangguan, serta menimbulkan kerugian energi. Dari sisi keandalan, kondisi ini berkontribusi pada penurunan kontinuitas penyaluran listrik serta memperbesar risiko kerusakan peralatan pelanggan maupun utilitas.

Penurunan Efisiensi Sistem Distribusi

Ketidakseimbangan beban memperbesar rugi-rugi energi dalam sistem, baik pada transformator maupun saluran distribusi. Rugi-rugi ini pada akhirnya meningkatkan losses sistem dan berdampak pada tingginya *energy not served* (ENS). PLN maupun operator distribusi perlu mengalokasikan lebih banyak energi pembangkitan untuk menutup rugi-rugi, sehingga efisiensi keseluruhan sistem menurun [16].

Peningkatan Frekuensi Gangguan dan Pemadaman

Beban tidak seimbang dapat memicu pemanasan abnormal pada komponen proteksi, konduktor, maupun sambungan. Hal ini meningkatkan kemungkinan trip proteksi, baik pada sisi distribusi maupun pada peralatan pelanggan. Dalam kasus ekstrem, ketidakseimbangan dapat memicu *nuisance tripping* atau bahkan kegagalan permanen transformator, yang berujung pada pemadaman lebih luas [18].

Penurunan Kontinuitas dan Keandalan Pasokan

Keandalan sistem distribusi biasanya diukur dengan indeks seperti SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). Ketidakseimbangan beban berkontribusi pada kenaikan kedua indeks tersebut karena menambah frekuensi gangguan dan lamanya pemulihan sistem. Dengan demikian, ketidakseimbangan beban menjadi salah satu faktor yang juga dapat menurunkan mutu pelayanan kepada pelanggan [2].

Dampak pada Peralatan Pelanggan

Distorsi tegangan akibat ketidakseimbangan berdampak pada penurunan performa peralatan pelanggan. Peralatan berbasis motor induksi, misalnya, mengalami peningkatan arus dan torsi berfluktuasi yang mempercepat keausan. Sementara peralatan elektronik sensitif berpotensi mengalami kerusakan dini akibat tegangan yang tidak stabil. Dampak ini pada akhirnya menambah keluhan pelanggan terhadap kualitas pasokan listrik [26].

Dengan demikian, ketidakseimbangan beban bukan hanya isu teknis terbatas pada transformator, melainkan juga persoalan operasional dan keandalan sistem distribusi secara keseluruhan. Pemantauan dan validasi data inspeksi menjadi langkah strategis untuk mengurangi dampak operasional ini, sekaligus mendukung tercapainya target mutu pelayanan tenaga listrik.

e. Standar Batas Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban pada jaringan distribusi tidak hanya menimbulkan dampak teknis dan operasional, tetapi juga berkaitan langsung dengan kepatuhan terhadap standar kualitas daya listrik yang berlaku. Standar internasional maupun nasional telah menetapkan ambang batas tertentu untuk tingkat ketidakseimbangan tegangan maupun arus yang masih dapat ditoleransi. Penetapan batas ini penting, karena melebihi ambang yang ditentukan berpotensi menimbulkan kerugian teknis, menurunkan efisiensi sistem, serta memperpendek umur peralatan listrik baik di sisi utilitas maupun pelanggan.

Dalam praktiknya, standar ini berfungsi sebagai acuan bagi operator sistem distribusi dalam memantau, mengevaluasi, dan mengambil tindakan korektif terhadap kondisi pembebanan yang tidak seimbang. Sebagai contoh, bila ketidakseimbangan tegangan melebihi 2% sesuai rekomendasi IEEE dan IEC, maka perlu dilakukan inspeksi lapangan untuk mengidentifikasi sumber masalah, seperti pembagian beban pelanggan yang tidak merata atau sambungan netral yang bermasalah. Dengan demikian, standar batas ketidakseimbangan beban tidak hanya menjadi indikator teknis, tetapi juga menjadi instrumen manajemen dalam menjaga keandalan dan mutu pelayanan tenaga listrik.

Oleh karena itu, untuk memastikan kualitas daya tetap sesuai dengan kriteria yang dapat diterima, diperlukan acuan dari standar yang diakui secara internasional maupun nasional. Standar-standar ini memberikan batas kuantitatif mengenai seberapa besar ketidakseimbangan tegangan atau arus yang masih dapat ditoleransi tanpa menimbulkan dampak signifikan terhadap transformator, peralatan pelanggan, maupun keandalan sistem. Beberapa standar yang umum dijadikan rujukan antara lain IEEE, NEMA, dan IEC, serta standar teknis yang diterapkan oleh PLN melalui SPLN. Beberapa standar internasional dan nasional yang relevan adalah sebagai berikut:

IEEE Std 1159-2009 – Power Quality Monitoring

IEEE Std 1159-2009 merupakan standar internasional yang memberikan pedoman mengenai praktik pemantauan kualitas daya listrik (*power quality monitoring*). Salah satu aspek penting yang dibahas dalam standar ini adalah tegangan tidak seimbang (*voltage unbalance*) yang sering terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat ketidakseimbangan beban antar fasa.

Menurut IEEE, tegangan tidak seimbang didefinisikan sebagai kondisi ketika tegangan fasa tidak sama besar atau tidak terpisah secara merata sebesar 120° . Standar ini menetapkan bahwa nilai *voltage unbalance (VU)* yang terukur di titik pelayanan (*point of common coupling/PCC*) sebaiknya tidak melebihi 2% dari tegangan nominal.

Batas 2% ini dipandang kritis karena melebihi nilai tersebut dapat menimbulkan dampak teknis serius, khususnya terhadap kinerja motor induksi dan

transformator. Motor induksi, misalnya, akan mengalami kenaikan arus pada salah satu fasanya ketika beroperasi dengan tegangan tidak seimbang, yang mengakibatkan peningkatan rugi-rugi, torsi berfluktuasi, pemanasan berlebih, dan pada akhirnya mengurangi umur pakai motor [27].

Selain itu, IEEE 1159 juga menekankan pentingnya melakukan pemantauan ketidakseimbangan secara kontinu dengan alat ukur yang memiliki resolusi waktu cukup tinggi. Hal ini penting karena ketidakseimbangan tidak selalu konstan, melainkan bisa berubah-ubah tergantung pada pola konsumsi pelanggan. Dengan demikian, pemantauan berbasis inspeksi lapangan yang tervalidasi menjadi salah satu langkah krusial untuk memastikan bahwa tegangan pada jaringan distribusi tetap berada dalam batas yang ditentukan.

NEMA MG-1 (Motors and Generators Standard)

NEMA MG-1 merupakan standar yang diterbitkan oleh *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)* dan berfokus pada motor serta generator listrik. Dokumen ini banyak dijadikan acuan oleh pabrikan maupun operator sistem tenaga dalam menentukan batas toleransi ketidakseimbangan tegangan yang dapat diterima oleh motor listrik.

Menurut NEMA MG-1, motor induksi dapat tetap beroperasi dengan aman pada kondisi ketidakseimbangan tegangan hingga 1%. Apabila ketidakseimbangan berada di kisaran 2%–5%, motor masih dapat beroperasi tetapi dengan risiko tertentu, antara lain peningkatan pemanasan lilitan, penurunan efisiensi, serta penurunan umur pakai motor. Bila ketidakseimbangan tegangan melebihi 5%, motor sebaiknya tidak dijalankan secara kontinu karena risiko kerusakan meningkat signifikan [28].

Keterkaitan standar ini dengan sistem distribusi tenaga listrik sangat penting. Pada dasarnya, transformator distribusi sering kali menyuplai beban motor induksi di sisi pelanggan. Jika tegangan yang diterima pelanggan melebihi batas ketidakseimbangan yang direkomendasikan NEMA, maka akan berimplikasi langsung pada meningkatnya keluhan pelanggan serta kemungkinan kerusakan peralatan. Oleh

sebab itu, PLN atau operator distribusi perlu memastikan bahwa tegangan di sisi pelanggan berada dalam batas toleransi sesuai standar NEMA.

Dengan demikian, standar NEMA MG-1 melengkapi IEEE Std 1159 dengan memberikan batasan yang lebih spesifik terkait dampak tegangan tidak seimbang pada motor induksi, yang merupakan beban dominan dalam sistem distribusi.

IEC 61000-3-13 Assessment of Emission Limits for Unbalanced Installations

IEC 61000-3-13 merupakan standar internasional yang dikeluarkan oleh *International Electrotechnical Commission (IEC)* untuk memberikan pedoman dalam menilai batas emisi ketidakseimbangan (*unbalance emission limits*) dari suatu instalasi yang terhubung ke jaringan tenaga listrik. Fokus utama standar ini adalah memastikan bahwa pemasangan instalasi baru tidak menyebabkan ketidakseimbangan tegangan yang melebihi batas yang dapat diterima pada sistem distribusi.

Menurut [26], ketidakseimbangan tegangan yang terukur di titik interkoneksi sistem distribusi tidak boleh melebihi 2% untuk jaringan tegangan rendah (LV) maupun menengah (MV). Pada sistem tegangan tinggi (HV) dan ekstra tinggi (EHV), standar ini bahkan menganjurkan batas yang lebih ketat, umumnya $\leq 1,5\%$, karena sistem pada level tersebut lebih sensitif terhadap fluktuasi tegangan.

Standar ini juga menekankan pentingnya koordinasi antara operator jaringan dan pengguna (pelanggan) dalam mengendalikan ketidakseimbangan. Apabila suatu instalasi pelanggan, misalnya industri besar dengan motor-motor tiga fasa, menghasilkan ketidakseimbangan signifikan, maka operator berhak meminta perbaikan atau redistribusi beban agar emisi ketidakseimbangan tetap dalam batas toleransi.

Relevansinya terhadap distribusi tenaga listrik di Indonesia adalah bahwa PLN sebagai operator wajib mengacu pada batasan yang diakui secara internasional, sehingga mutu tegangan yang diterima pelanggan tetap sesuai standar. Selain itu, IEC 61000-3-13 memberikan justifikasi teknis bagi pentingnya inspeksi lapangan dan validasi data, karena hanya dengan pemantauan yang akurat kondisi tidak seimbang dapat dipastikan tetap sesuai ambang batas.

SPLN dan PLN Technical Standards

Selain standar internasional, PLN sebagai operator sistem tenaga listrik di Indonesia memiliki standar teknis internal yang diatur dalam dokumen SPLN (Standar Perusahaan Listrik Negara) maupun buku pedoman teknis. Salah satu yang relevan adalah [20]: Sistem Jaringan Distribusi Tegangan Rendah, yang mengatur ketentuan teknis mengenai tegangan, arus, serta kualitas pelayanan tenaga listrik pada jaringan distribusi.

Menurut standar ini, deviasi tegangan pada sisi pelanggan tidak boleh melebihi $\pm 10\%$ dari tegangan nominal dalam kondisi normal pelayanan. Hal ini berarti, untuk sistem 230/400 V, tegangan fasa-ke-netral yang dapat diterima berkisar antara 207 V hingga 253 V. Sementara itu, pada sisi arus, PLN menerapkan batas ketidakseimbangan arus antar fasa $\leq 20\%$ dari arus rata-rata. Jika nilai ini terlampaui, kondisi dianggap tidak normal dan berpotensi menimbulkan kerugian energi serta mempercepat degradasi peralatan distribusi.

Selain SPLN, PLN juga memiliki Buku 4 [19] – Pedoman Distribusi Tenaga Listrik, yang menekankan pentingnya pemerataan beban pada transformator distribusi. Dalam buku ini dijelaskan bahwa pemerataan arus antar fasa merupakan indikator penting dalam inspeksi lapangan, karena beban yang tidak seimbang dapat menimbulkan risiko trafo *overload* parsial, rugi-rugi tambahan, dan penurunan keandalan sistem.

Dengan demikian, standar internal PLN memberikan landasan operasional yang lebih kontekstual untuk kondisi jaringan di Indonesia, sekaligus melengkapi standar internasional seperti IEEE dan IEC. Bagi penelitian ini, SPLN dan Buku 4 PLN menjadi acuan penting dalam menentukan validasi data inspeksi, terutama untuk memastikan bahwa kondisi beban di lapangan sesuai dengan ambang batas yang ditetapkan.

Dari berbagai standar yang telah dibahas, baik internasional maupun nasional, terlihat adanya keselarasan bahwa ketidakseimbangan beban harus dijaga dalam batas yang ketat. IEEE dan IEC menetapkan ambang maksimal sekitar 2% untuk

ketidakseimbangan tegangan, sementara NEMA menekankan dampak langsung terhadap motor induksi apabila ketidakseimbangan melebihi 1–5%. Di sisi lain, PLN melalui SPLN dan pedoman teknis internalnya juga memberikan batas deviasi tegangan $\pm 10\%$ serta ketidakseimbangan arus maksimum 20%.

Konsistensi regulasi tersebut menegaskan bahwa ketidakseimbangan bukan sekadar permasalahan teknis, melainkan juga indikator kualitas daya dan keandalan sistem distribusi. Dengan adanya standar, operator memiliki dasar objektif untuk menentukan kapan kondisi di lapangan masih aman, serta kapan tindakan korektif seperti redistribusi beban atau pemeliharaan gardu harus dilakukan.

Dalam konteks penelitian ini, standar-standar tersebut menjadi acuan fundamental untuk merancang sistem validasi data inspeksi. Validasi yang terintegrasi dengan acuan batas ketidakseimbangan akan memastikan hasil inspeksi tidak hanya akurat secara data, tetapi juga sesuai dengan standar kualitas daya yang berlaku, sehingga langkah perbaikan dapat dilakukan tepat waktu.

f. Peran Validasi Data Inspeksi

Inspeksi lapangan merupakan salah satu langkah penting dalam pemeliharaan sistem distribusi tenaga listrik. Namun, proses pencatatan manual sering kali menghadapi kelemahan, seperti ketidaksesuaian data dengan kondisi nyata di lapangan maupun risiko manipulasi informasi oleh petugas. Ketidaksesuaian ini dapat berdampak serius, misalnya kesalahan dalam menilai kondisi transformator, yang pada akhirnya berimplikasi pada meningkatnya risiko trafo mengalami overload atau beban tidak seimbang [18].

Dalam konteks tersebut, validasi data inspeksi memiliki peran krusial sebagai mekanisme pengendali mutu (*quality control*). Melalui validasi, data hasil inspeksi dapat dipastikan sesuai dengan kondisi lapangan karena diverifikasi melalui beberapa parameter seperti lokasi, waktu, dan kesesuaian standar pengukuran. Dengan teknologi berbasis **NFC** dan **QR Code**, keaslian data dapat ditingkatkan melalui autentikasi lokasi inspeksi dan pengikatan identitas gardu. Penambahan validasi berbasis **GPS** dan batasan waktu input semakin memperkuat integritas data yang dikumpulkan [23].

Selain menjamin keaslian data, validasi juga berfungsi sebagai instrumen untuk memastikan kepatuhan terhadap standar kualitas daya. Misalnya, standar IEEE dan IEC menekankan bahwa ketidakseimbangan tegangan tidak boleh melebihi 2% agar tidak menimbulkan dampak merugikan pada transformator dan motor induksi [21]; [26]). Sementara itu, standar PLN melalui SPLN T6.001-2013 menyatakan bahwa deviasi tegangan yang dapat diterima pelanggan adalah $\pm 10\%$ dari nominal, dengan ketidakseimbangan arus antar fasa sebaiknya tidak lebih dari 20% [20]. Dengan validasi data inspeksi, setiap hasil pengukuran yang melampaui batas ini dapat segera terdeteksi sehingga langkah korektif dapat dilakukan lebih cepat.

Dengan demikian, validasi data inspeksi tidak hanya berfungsi sebagai sarana verifikasi keaslian pengukuran, tetapi juga sebagai alat deteksi dini yang mendukung *preventive maintenance*. Melalui sistem validasi, operator distribusi dapat memastikan bahwa data yang menjadi dasar pengambilan keputusan teknis benar-benar akurat, sah, dan sesuai standar yang berlaku, sehingga keandalan dan kualitas pelayanan tenaga listrik kepada pelanggan dapat ditingkatkan.

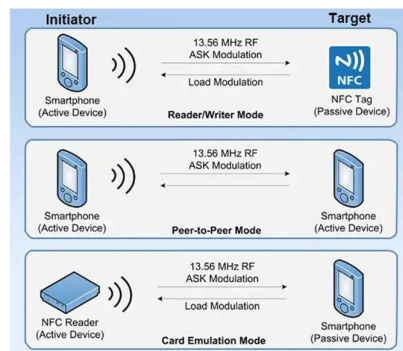
2.2.5. Teknologi Validasi Data

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan akurasi data inspeksi pada jaringan distribusi tenaga listrik, penggunaan teknologi validasi menjadi semakin penting. Teknologi ini berfungsi untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan benar-benar merepresentasikan kondisi lapangan, serta mencegah terjadinya manipulasi atau pencatatan fiktif oleh petugas inspeksi. Dalam konteks penelitian ini, validasi tidak hanya bertujuan untuk mengonfirmasi keaslian data, tetapi juga sebagai mekanisme pengendalian mutu agar hasil inspeksi sesuai dengan standar teknis yang berlaku.

Beberapa teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung validasi data inspeksi di antaranya adalah **Near Field Communication (NFC)**, **Quick Response (QR) Code**, **Global Positioning System (GPS) dengan geofencing**, serta **pembatasan waktu inspeksi**. Setiap teknologi memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri, sehingga kombinasi penggunaannya diharapkan mampu memberikan sistem validasi yang lebih komprehensif.

a. NFC (Near Field Communication)

Near Field Communication (NFC) adalah teknologi komunikasi nirkabel jarak dekat yang bekerja pada frekuensi 13,56 MHz dengan jangkauan efektif sekitar 1–10 cm. Teknologi ini dirancang untuk memfasilitasi pertukaran data dengan cara yang cepat dan aman, dan banyak diterapkan dalam pembayaran digital, autentikasi, serta sistem pelacakan aset karena kemudahan penggunaannya [29].



Gambar 2. 12. Cara Kerja NFC

Dalam penelitian ini, NFC difungsikan sebagai mekanisme utama validasi fisik lokasi inspeksi gardu distribusi. Setiap gardu distribusi dipasang tag NFC dengan identitas unik (UID) yang kemudian diregistrasi pada basis data sistem. Saat inspeksi dilakukan, petugas harus menempelkan ponselnya ke tag tersebut sehingga aplikasi dapat membaca UID, mencatat waktu, serta menghubungkannya dengan akun petugas. Dengan cara ini, sistem dapat memastikan bahwa pengisian data inspeksi benar-benar dilakukan di lokasi gardu yang bersangkutan, bukan di tempat lain [5].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa NFC mampu meningkatkan kecepatan, akurasi, dan efisiensi proses pencatatan dibandingkan metode manual. Misalnya, penerapan NFC pada sistem inventarisasi berbasis Android terbukti mempercepat pelacakan barang dan mengurangi kesalahan pencatatan, sehingga sangat potensial diterapkan dalam sistem inspeksi lapangan yang memerlukan validasi keaslian data [5]; [6].

Keunggulan NFC lainnya adalah sifatnya yang pasif, sehingga tidak memerlukan sumber daya tambahan dan dapat dipasang permanen pada gardu. Selain itu, mayoritas perangkat Android modern sudah mendukung fitur NFC, sehingga

implementasi dapat dilakukan tanpa perangkat tambahan. Meski demikian, keterbatasan tetap ada, khususnya terkait kemungkinan kloning tag standar yang hanya menyimpan UID. Oleh karena itu, sistem dalam penelitian ini dirancang tidak hanya bergantung pada NFC, tetapi juga dikombinasikan dengan validasi GPS (*geofencing*) dan pembatasan waktu inspeksi untuk memastikan integritas data secara menyeluruh [30].

Dengan demikian, NFC berperan sebagai lapisan pertama validasi yang menjamin keterhubungan fisik antara petugas, gardu, dan data inspeksi. Integrasi NFC dengan mekanisme validasi lain menjadikannya solusi yang lebih handal untuk mendukung keandalan data pengukuran pada gardu distribusi.

b. Quick Response (QR) Code

Quick Response (QR) Code adalah kode matriks dua dimensi yang mampu menyimpan data dalam bentuk teks, angka, maupun tautan digital, dan dapat dipindai dengan kamera smartphone secara cepat. Teknologi ini populer karena biaya implementasinya rendah, mudah dicetak, serta kompatibel dengan hampir semua perangkat bergerak modern. Oleh sebab itu, QR Code banyak digunakan dalam sistem identifikasi dan autentikasi sederhana [31].



Gambar 2. 13. Cara Kerja QR Code

Dalam penelitian ini, QR Code diposisikan sebagai opsi cadangan (*fallback*) ketika mekanisme utama, yaitu NFC, tidak dapat digunakan. Kondisi ini dapat terjadi jika *smartphone* petugas tidak memiliki fitur NFC, atau jika tag NFC yang terpasang pada gardu mengalami kerusakan. Dengan memindai QR Code yang ditempel pada

gardu, aplikasi inspeksi akan mengidentifikasi lokasi gardu yang bersangkutan, mencatat waktu pemindaian, serta menghubungkannya dengan akun petugas.

Kelebihan utama QR Code adalah kemudahan distribusi dan perawatan. Tag dapat dicetak ulang dengan cepat jika rusak atau hilang, tanpa biaya besar. Namun, kelemahan mendasarnya adalah risiko duplikasi, karena QR Code statis dapat dengan mudah difoto atau disalin. Untuk mengurangi kelemahan ini, sistem validasi dirancang tidak hanya bergantung pada QR Code, tetapi juga mengombinasikannya dengan validasi GPS (*geofencing*) dan pembatasan waktu inspeksi. Dengan demikian, meskipun QR Code dipalsukan atau digunakan ulang, data tetap tidak akan diterima apabila tidak sesuai dengan lokasi dan waktu yang sah.

Secara keseluruhan, QR Code dalam proyek ini berperan sebagai *backup system* yang memastikan keberlangsungan proses validasi meskipun NFC gagal digunakan. Kehadirannya meningkatkan fleksibilitas sistem, namun tetap dikendalikan oleh lapisan validasi lain untuk menjaga integritas data inspeksi gardu distribusi.

c. Global Positioning System (GPS) & Geofencing

Global Positioning System (GPS) merupakan teknologi navigasi berbasis satelit yang memungkinkan perangkat memperoleh informasi lokasi secara *real-time* dengan tingkat akurasi tertentu. Dalam sistem validasi data inspeksi gardu distribusi, GPS digunakan untuk memastikan bahwa petugas benar-benar berada di sekitar gardu ketika melakukan pencatatan hasil pengukuran.

Untuk memperkuat fungsi ini, sistem dilengkapi dengan *geofencing*, yaitu pembuatan batas virtual (radius) di sekitar titik koordinat gardu. Dengan metode ini, aplikasi hanya akan menerima input data apabila perangkat berada dalam radius yang telah ditentukan, misalnya 25–50 meter dari titik gardu. Mekanisme ini penting untuk mencegah pengisian data dari lokasi yang tidak sah atau dilakukan tanpa kunjungan langsung ke lapangan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan *geofencing* dalam aplikasi Android mampu memberikan fungsi kontrol berbasis lokasi yang efektif,

misalnya dalam sistem promosi yang dipicu ketika pengguna memasuki area pusat perbelanjaan [11]. Prinsip serupa dapat diterapkan dalam proyek ini untuk memicu validasi inspeksi hanya jika perangkat berada di area gardu. Selain itu, studi lain menjelaskan bahwa *geofencing* juga digunakan dalam penelitian perilaku berbasis lokasi untuk mendeteksi aktivitas pengguna secara *real-time*, sehingga membuktikan reliabilitas teknologi ini dalam aplikasi *mobile modern* [8].

Meski demikian, keterbatasan tetap ada, khususnya pada akurasi GPS di lingkungan dengan banyak penghalang, seperti pepohonan lebat atau bangunan tinggi. Oleh karena itu, sistem perlu menetapkan ambang akurasi tertentu, misalnya hanya menerima data dengan akurasi < 20 meter, agar hasil validasi tetap dapat dipercaya.

Dengan demikian, kombinasi GPS dan *geofencing* dalam penelitian ini berperan sebagai lapisan validasi kedua setelah NFC/QR Code, yang memastikan bahwa inspeksi dilakukan di lokasi gardu yang benar dan mengurangi risiko manipulasi data inspeksi.

d. Validasi Waktu

Validasi waktu adalah mekanisme pembatasan temporal yang memverifikasi bahwa input data dilakukan pada rentang jam yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, dua jendela waktu yang dipakai adalah LWBP (10:00–16:00 WIB) dan WBP (18:00–22:00 WIB) — ditetapkan karena keduanya mewakili kondisi beban berbeda yang relevan untuk analisis beban dan tegangan pada gardu distribusi. Jika data dikirimkan di luar jendela yang ditentukan, sistem akan menolak atau menandai entri tersebut untuk pemeriksaan lanjutan [9].

Penerapan pembatasan waktu memberikan dua manfaat penting. Pertama, dari sisi operasional, ia menjamin bahwa pengukuran merepresentasikan kondisi sistem pada periode beban yang diinginkan sehingga analisis beban (LWBP vs WBP) menjadi bermakna. Kedua, dari sisi keamanan data, pembatasan temporal berfungsi sebagai lapisan proteksi tambahan: upaya pengisian data fiktif di luar jadwal yang telah ditetapkan dapat dideteksi dan ditolak oleh server [32].

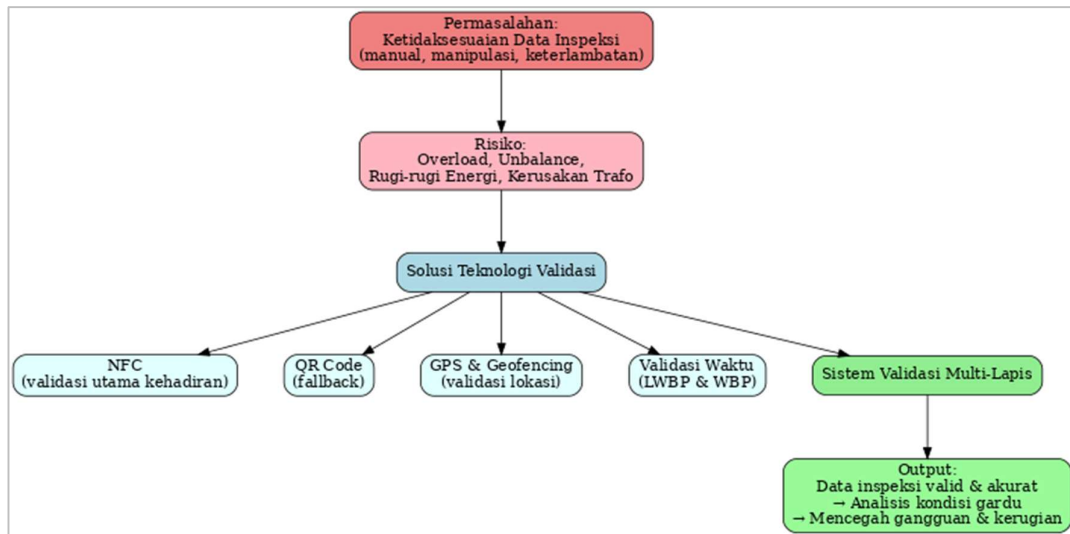
Konsep validasi berbasis waktu juga sering dipakai dalam model akses terikat-waktu untuk IoT (*Internet of Thing*) atau sistem terdistribusi, di mana kredensial atau hak akses diberikan hanya untuk interval waktu tertentu dan dapat dicabut ketika waktu berakhir. Pendekatan ini memungkinkan kontrol akses yang bersifat sementara (*time-limited tokens*) dan dapat digabungkan dengan mekanisme *revocation* untuk menutup celah *abuse* (mis. *token replay*) saat perangkat bekerja *offline* dan baru sinkron pada waktu berikutnya [10]; [9].

Namun, pembatasan waktu memiliki keterbatasan praktis: keterlambatan petugas di lapangan, gangguan komunikasi, atau kondisi darurat dapat membuat inspeksi yang sah tertolak bila sistem terlalu kaku. Oleh karena itu, desain yang baik biasanya menyediakan prosedur mitigasi — misalnya mekanisme *override* terkontrol (persetujuan supervisor) atau *window* sinkronisasi terbatas (mis. dapat mengajukan validasi ulang dengan bukti tambahan) — sehingga fleksibilitas operasional tetap terjaga tanpa mengorbankan integritas data.

Secara ringkas, validasi waktu dalam sistem ini bertindak sebagai lapisan proteksi temporal yang melengkapi validasi lokasi (NFC/QR Code + GPS). Dengan mengkombinasikan bukti fisik, lokasi, dan batas waktu, sistem menjadi lebih sulit untuk dimanipulasi dan lebih mampu menghasilkan data inspeksi yang andal untuk analisis kondisi gardu distribusi. [9]; [10]; [32]).

2.3. Kerangka Pemikiran

Diagram Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 14. Diagram Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini diawali dari identifikasi permasalahan utama yang dihadapi dalam inspeksi gardu distribusi, yaitu adanya potensi ketidaksesuaian data hasil pengukuran dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Hal ini dapat disebabkan oleh pencatatan manual yang rentan kesalahan, keterlambatan pelaporan, maupun kemungkinan manipulasi data oleh petugas.

Permasalahan tersebut menimbulkan sejumlah risiko teknis pada sistem distribusi, di antaranya transformator beroperasi dalam kondisi *overload*, ketidakseimbangan beban (*unbalance*), meningkatnya rugi-rugi energi, hingga berujung pada kerusakan peralatan. Risiko ini berimplikasi pada menurunnya keandalan sistem distribusi tenaga listrik secara keseluruhan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dirancang sebuah solusi berbasis teknologi validasi berlapis. Komponen validasi yang diintegrasikan adalah:

- NFC sebagai mekanisme utama untuk memverifikasi kehadiran petugas di lokasi inspeksi.
- QR Code sebagai mekanisme cadangan (*fallback*) apabila perangkat tidak mendukung NFC atau terjadi kerusakan pada tag.

- GPS & Geofencing untuk memastikan bahwa input data hanya dapat dilakukan di radius lokasi gardu yang sudah ditentukan.
- Validasi waktu (LWBP dan WBP) untuk menjamin bahwa pengukuran dilakukan pada periode yang sesuai dengan kebutuhan analisis beban dan tegangan.

Integrasi berbagai komponen tersebut membentuk sistem validasi berlapis. Dengan sistem ini, input data inspeksi hanya dapat dilakukan apabila memenuhi tiga syarat utama, yaitu validasi identitas (NFC/QR), validasi lokasi (GPS/*geofencing*), dan validasi waktu.

Hasil akhir dari kerangka pemikiran ini adalah sebuah output berupa data inspeksi yang valid, akurat, dan dapat dipercaya. Data tersebut dapat digunakan untuk analisis kondisi gardu distribusi secara *real-time* maupun historis, sehingga membantu pengawas dalam mengambil keputusan, mendeteksi potensi gangguan lebih dini, dan mencegah kerugian akibat kerusakan transformator maupun peningkatan rugi-rugi daya.