

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Bagian transmisi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban melalui saluran udara tegangan tinggi (SUTT) atau saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Agar penyaluran daya listrik tetap andal, sistem transmisi harus didukung dengan peralatan yang handal, sistem proteksi yang memadai, serta mekanisme monitoring yang baik.

Gangguan pada saluran transmisi dapat mengakibatkan penurunan kualitas daya, pemadaman sebagian atau keseluruhan wilayah, bahkan berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem aplikasi dan respon cepat terhadap gangguan.

Pengembangan sistem informasi terintegrasi dalam bidang ketenagalistrikan telah banyak diteliti sebagai upaya meningkatkan efisiensi operasional dan keandalan sistem. Penelitian yang dilakukan oleh Darmana dkk. (2020) menunjukkan bahwa integrasi sistem kendali dan informasi operasional pada sistem pembangkitan dan jaringan listrik mampu mempercepat pengambilan keputusan teknis serta mengurangi ketergantungan pada proses manual. Konsep ini relevan dengan sistem transmisi, di mana kecepatan dan akurasi informasi sangat menentukan efektivitas penanganan gangguan.

Selain itu, Darmana dan Koerniawan (2019) menekankan bahwa pemanfaatan sistem berbasis teknologi informasi pada sektor energi tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai pendukung pengambilan keputusan operasional di lapangan. Dengan adanya sistem informasi terpusat, data teknis dan operasional dapat diakses secara lebih cepat oleh pengguna.

Dalam konteks proteksi dan gangguan sistem tenaga listrik, penelitian mengenai rele jarak menunjukkan bahwa informasi jarak gangguan yang dihasilkan oleh sistem proteksi

perlu didukung oleh data lapangan yang memadai agar dapat ditindaklanjuti secara efektif (Badruzzaman & Ahmad, 2023). Tanpa integrasi data tower, isolator, dan kondisi lingkungan, informasi jarak gangguan cenderung hanya bersifat numerik dan memerlukan proses tambahan untuk identifikasi lokasi fisik gangguan.

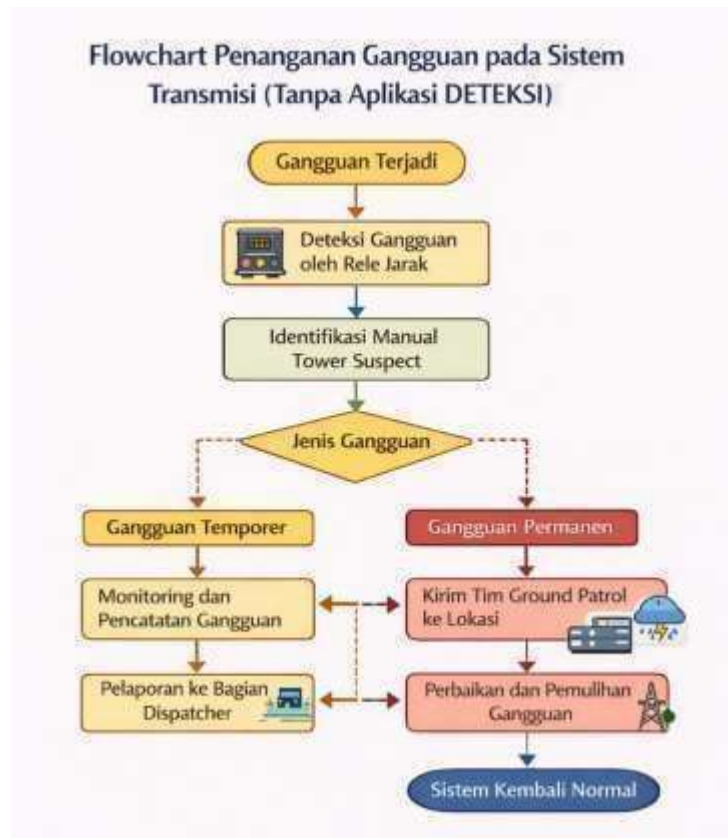
Penelitian lain terkait estimasi lokasi gangguan juga menegaskan pentingnya sistem pendukung berbasis data untuk meningkatkan akurasi dan kecepatan penanganan gangguan, baik melalui pendekatan konvensional maupun berbasis teknologi informasi (Budak & Akbal, 2020; Budak & Akbal, 2021). Oleh karena itu, pengembangan aplikasi yang mengintegrasikan informasi jarak gangguan dengan data teknis tower dan operasional lapangan menjadi solusi yang relevan dan aplikatif.

Perkembangan teknologi informasi dalam sektor ketenagalistrikan telah membawa perubahan signifikan terhadap pola operasi dan pemeliharaan sistem transmisi tenaga listrik. Transformasi digital tidak lagi hanya berfokus pada otomatisasi pembangkit dan distribusi, tetapi juga merambah ke sistem transmisi sebagai tulang punggung penyaluran energi listrik. Dalam sistem transmisi modern, data operasional tersedia dalam jumlah besar dan diperoleh secara real-time melalui perangkat proteksi digital, sistem monitoring, serta SCADA.

Namun demikian, meskipun sistem proteksi telah berkembang pesat dan mampu memberikan informasi gangguan secara cepat, proses lanjutan dalam menentukan lokasi fisik gangguan di lapangan masih sering dilakukan secara manual. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara sistem proteksi digital dan sistem informasi operasional di tingkat lapangan. Integrasi antara keduanya menjadi kebutuhan penting dalam rangka meningkatkan efisiensi kerja dan keandalan sistem transmisi.

Digitalisasi pada proses identifikasi gangguan memungkinkan penyederhanaan alur kerja, pengurangan waktu koordinasi, serta pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis data. Aplikasi yang dirancang dalam penelitian ini merupakan salah satu bentuk implementasi transformasi digital pada level operasional, dengan mengintegrasikan data jarak gangguan, data tower, serta informasi petugas lapangan dalam satu platform yang mudah diakses.

2.1.2 Gangguan pada Saluran Transmisi



Gambar 2. 1. Flowchart Saat Terjadi Gangguan Transmisi

Gangguan transmisi dapat berupa gangguan sementara (temporary fault) atau gangguan permanen (permanent fault). Gangguan sementara biasanya disebabkan oleh kilatan petir, pohon atau binatang yang menyentuh konduktor, sedangkan gangguan permanen dapat terjadi akibat kerusakan isolator, patahnya penghantar, atau kerusakan peralatan tower.

Jenis-jenis gangguan utama pada saluran transmisi antara lain:

1. Single Line-to-Ground Fault (1 fasa ke tanah) → gangguan paling sering terjadi, biasanya disebabkan isolasi yang rusak atau kontak langsung konduktor dengan tanah.
2. Line-to-Line Fault (gangguan antar fasa) → terjadi jika dua konduktor bersentuhan langsung.
3. Double Line-to-Ground Fault → dua konduktor mengalami kontak ke tanah.
4. Three-Phase Fault → ketiga konduktor fasa mengalami hubungan singkat, biasanya akibat kegagalan besar.

Gangguan ini dapat memicu kerja rele proteksi dan pemutus tenaga (PMT), sehingga area terdampak mengalami padam sementara hingga gangguan diselesaikan.

2.1.3 Rele Jarak (Distance Relay)

Rele jarak (*distance relay*) merupakan salah satu perangkat proteksi utama yang digunakan pada sistem transmisi tenaga listrik, khususnya pada saluran tegangan menengah dan tinggi seperti SUTT dan SUTET. Rele ini dirancang untuk mendeteksi gangguan berdasarkan pengukuran impedansi saluran antara titik pemasangan rele dan lokasi gangguan. Prinsip dasar kerja rele jarak adalah bahwa nilai impedansi saluran sebanding dengan panjang saluran, sehingga jarak gangguan dapat diperkirakan dari nilai impedansi yang terukur.

Pada kondisi operasi normal, rele jarak memonitor besaran listrik berupa tegangan dan arus yang diperoleh dari transformator tegangan (PT) dan transformator arus (CT). Besaran tegangan dan arus ini kemudian digunakan oleh rele untuk menghitung impedansi saluran dengan perbandingan antara tegangan dan arus ($Z = V/I$). Selama nilai impedansi

yang terukur berada di luar daerah proteksi yang telah ditentukan, rele tidak akan bekerja dan sistem transmisi tetap beroperasi normal.

Ketika terjadi gangguan pada saluran transmisi, seperti hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa, atau gangguan tiga fasa, nilai arus akan meningkat secara signifikan dan tegangan akan mengalami penurunan. Perubahan besaran ini menyebabkan nilai impedansi yang dihitung oleh rele jarak menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi normal. Apabila nilai impedansi tersebut masuk ke dalam zona proteksi rele yang telah ditetapkan, rele akan mengenali kondisi tersebut sebagai gangguan.

Rele jarak umumnya dibagi ke dalam beberapa zona proteksi untuk menjamin selektivitas dan keandalan sistem proteksi. Zona 1 melindungi sebagian besar panjang saluran dan bekerja tanpa tunda waktu (instan). Zona 2 berfungsi sebagai proteksi cadangan dengan jangkauan yang lebih luas dan memiliki tunda waktu tertentu. Zona 3 melindungi area yang lebih luas lagi dan berfungsi sebagai proteksi cadangan jarak jauh. Pembagian zona ini bertujuan agar gangguan dapat diputus oleh rele terdekat dengan lokasi gangguan terlebih dahulu.

Setelah rele jarak mendeteksi gangguan dan menentukan zona proteksi yang terlibat, rele akan mengirimkan sinyal trip ke pemutus tenaga (PMT) untuk memutuskan aliran listrik pada saluran yang terganggu. Pemutusan ini dilakukan untuk mengisolasi bagian sistem yang mengalami gangguan dan mencegah kerusakan peralatan serta gangguan meluas ke bagian sistem lainnya.

Selain memberikan perintah pemutusan, rele jarak juga mampu menampilkan informasi jarak gangguan dalam satuan kilometer atau persen panjang saluran. Informasi ini sangat penting bagi petugas operasi dan pemeliharaan karena dapat digunakan sebagai acuan awal untuk menentukan lokasi gangguan di lapangan. Namun demikian, informasi jarak gangguan yang ditampilkan oleh rele jarak masih bersifat estimasi dan perlu dikaitkan dengan data fisik saluran, seperti posisi tower dan kondisi lingkungan, untuk memperoleh lokasi gangguan yang lebih akurat.

Dengan demikian, rele jarak tidak hanya berfungsi sebagai perangkat proteksi untuk mengamankan sistem transmisi, tetapi juga sebagai sumber informasi penting dalam proses

penanganan gangguan. Integrasi informasi jarak gangguan dari rele jarak dengan data teknis dan operasional lapangan dapat meningkatkan kecepatan dan efektivitas penanganan gangguan pada sistem transmisi tenaga listrik.



Gambar 2. 2 Rele Jarak (Distance Relay)

(Dokumentasi Pribadi)

2.1.4 Tower Transmisi



Gambar 2. 3 Tower Transmisi 150 kV

(Dokumentasi Pribadi)

Tower transmisi merupakan salah satu komponen utama pada sistem transmisi tenaga listrik yang berfungsi sebagai penopang penghantar, isolator, dan perlengkapan proteksi lainnya agar energi listrik dapat disalurkan dengan aman dan andal dari pusat pembangkitan menuju pusat beban. Pada sistem transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi seperti SUTT dan SUTET, tower dirancang untuk mampu menahan beban mekanis yang besar akibat berat konduktor, gaya tarik, serta pengaruh kondisi lingkungan seperti angin, hujan, dan petir. Secara konstruksi, tower transmisi umumnya terbuat dari baja galvanis yang dirancang dalam bentuk rangka (lattice tower). Penggunaan baja galvanis bertujuan untuk meningkatkan kekuatan struktur sekaligus melindungi material dari korosi akibat paparan cuaca dalam jangka waktu yang panjang. Bentuk rangka dipilih karena memiliki kekuatan yang baik dengan bobot relatif ringan serta memudahkan proses perakitan dan pemeliharaan di lapangan.

Berdasarkan fungsinya, tower transmisi dibedakan menjadi beberapa jenis, antara lain tower suspension dan tower tension. Tower suspension berfungsi untuk menopang penghantar pada jalur lurus atau dengan sudut kecil, sedangkan tower tension digunakan pada titik belokan, ujung saluran, atau lokasi dengan perubahan arah yang signifikan. Perbedaan fungsi ini mempengaruhi desain struktur tower, jumlah isolator, serta sistem penahan gaya tarik konduktor.

Tower transmisi juga dilengkapi dengan rangkaian isolator yang berfungsi untuk mengisolasi konduktor dari struktur tower sehingga arus listrik tidak mengalir ke tanah. Isolator yang digunakan pada sistem transmisi umumnya berupa isolator kaca, porselen, atau polimer, yang dipilih berdasarkan tingkat tegangan, kondisi lingkungan, dan kebutuhan operasional. Kondisi isolator sangat mempengaruhi keandalan sistem, karena isolator yang kotor, retak, atau rusak dapat menjadi penyebab terjadinya gangguan pada saluran transmisi.

Dalam konteks penanganan gangguan, tower transmisi memiliki peran penting sebagai titik referensi lokasi gangguan. Informasi mengenai posisi tower, jarak antar tower, serta data teknis lainnya digunakan oleh petugas untuk menentukan lokasi inspeksi dan perbaikan di lapangan. Oleh karena itu, ketersediaan data tower yang lengkap dan terstruktur menjadi sangat penting dalam mendukung proses penanganan gangguan yang cepat dan efisien.

Kondisi lingkungan di sekitar tower juga menjadi faktor yang perlu diperhatikan. Aktivitas manusia di bawah jaringan, pertumbuhan vegetasi, serta kondisi cuaca ekstrem dapat meningkatkan risiko terjadinya gangguan pada saluran transmisi. Oleh sebab itu, tower transmisi memerlukan kegiatan pemeliharaan rutin dan pemantauan kondisi secara berkala untuk memastikan seluruh komponen tetap berada dalam kondisi yang layak operasi.

Dalam tugas akhir ini, tower transmisi dijadikan sebagai objek utama dalam proses identifikasi lokasi gangguan. Data tower yang meliputi nomor tower, jarak dari gardu induk, jenis tower, tipe isolator, serta informasi petugas ground patrol diintegrasikan ke dalam sistem aplikasi sebagai basis data pendukung. Integrasi data tower ini bertujuan untuk menghubungkan informasi jarak gangguan dari rele jarak dengan lokasi fisik tower di

lapangan, sehingga proses penentuan lokasi gangguan dapat dilakukan secara lebih cepat dan akurat.

Dengan demikian, tower transmisi tidak hanya berfungsi sebagai struktur fisik penopang saluran, tetapi juga sebagai elemen penting dalam sistem informasi dan pengambilan keputusan operasional. Pemahaman yang baik mengenai karakteristik dan fungsi tower transmisi menjadi dasar penting dalam pengembangan sistem pendukung penanganan gangguan pada jaringan transmisi tenaga listrik.

Setiap tower memiliki komponen teknis penting, di antaranya:

- Jenis dan tipe tower (suspension, tension, corner, transposition)
- Isolator (porcelain, polymer, atau kaca) yang berfungsi menahan tegangan tinggi agar tidak bocor ke tower
- Peralatan proteksi seperti arcing horn atau lightning arrester untuk melindungi dari gangguan petir

Tabel 1. Data teknis tower transmisi

No	Atribut	Keterangan
1	Nomor Tower	Identitas unik tower
2	Jarak (km)	Jarak dari gardu induk
3	Jenis Tower	Suspension/Tension
4	Isolator	Kaca/Polimer
5	Proteksi	LA/Arcing Horn
6	Petugas	Ground Patrol

Data teknis ini penting untuk menentukan potensi sumber gangguan dan mempersiapkan strategi perbaikan.

2.1.5 Ground Patrol

Petugas *ground patrol* merupakan bagian penting dalam kegiatan operasi dan pemeliharaan sistem transmisi tenaga listrik, khususnya pada saluran SUTT dan SUTET. Petugas ini bertanggung jawab untuk melakukan inspeksi lapangan secara langsung guna memastikan kondisi fisik jaringan transmisi tetap dalam keadaan baik dan aman beroperasi. Keberadaan petugas *ground patrol* menjadi penghubung antara sistem proteksi dan kondisi aktual di lapangan, terutama saat terjadi gangguan pada saluran transmisi.

Dalam kondisi normal, petugas *ground patrol* melaksanakan kegiatan patroli rutin untuk memeriksa kondisi tower transmisi, konduktor, isolator, serta lingkungan sekitar jalur transmisi. Kegiatan ini bertujuan untuk mendeteksi potensi gangguan sejak dini, seperti pertumbuhan vegetasi yang mendekati konduktor, kerusakan isolator, korosi struktur tower, maupun aktivitas masyarakat di bawah jaringan yang berpotensi membahayakan sistem transmisi. Hasil patroli dicatat sebagai bahan evaluasi dan perencanaan pemeliharaan lanjutan.

Pada saat terjadi gangguan, peran petugas *ground patrol* menjadi semakin krusial. Petugas ditugaskan untuk melakukan pemeriksaan lapangan di lokasi yang dicurigai sebagai titik gangguan berdasarkan informasi dari sistem proteksi dan hasil analisis awal. Pemeriksaan ini meliputi identifikasi penyebab gangguan, seperti pohon yang menyentuh konduktor, isolator kotor atau retak, dampak cuaca ekstrem, maupun gangguan akibat aktivitas manusia.

Efektivitas kerja petugas *ground patrol* sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan keakuratan informasi yang diterima. Informasi yang terlambat atau tidak lengkap dapat menyebabkan keterlambatan dalam penanganan gangguan dan memperpanjang durasi pemadaman. Oleh karena itu, sistem pendukung yang mampu menyajikan informasi lokasi gangguan, data teknis tower, dan kondisi lingkungan secara cepat menjadi kebutuhan penting dalam mendukung kinerja petugas di lapangan.

Petugas ground patrol juga memiliki peran dalam proses pemulihan sistem setelah gangguan ditangani. Setelah perbaikan dilakukan, petugas memastikan bahwa kondisi jaringan telah kembali normal dan aman untuk dioperasikan. Laporan hasil pemeriksaan dan perbaikan disampaikan kepada bagian operasi sebagai dasar untuk evaluasi dan dokumentasi gangguan.

Dalam konteks tugas akhir ini, petugas ground patrol menjadi salah satu elemen penting yang diintegrasikan ke dalam sistem aplikasi sebagai data operasional. Informasi mengenai nama petugas, wilayah tanggung jawab, dan kontak petugas disertakan dalam database untuk mempermudah proses penugasan saat terjadi gangguan. Integrasi data petugas ground patrol ke dalam aplikasi bertujuan untuk mempercepat koordinasi dan memastikan bahwa penanganan gangguan dapat dilakukan secara tepat sasaran.

Dengan demikian, petugas ground patrol tidak hanya berperan sebagai pelaksana inspeksi lapangan, tetapi juga sebagai komponen penting dalam sistem keandalan transmisi tenaga listrik. Dukungan sistem informasi yang terintegrasi dapat meningkatkan efektivitas kerja petugas ground patrol, mengurangi waktu respon penanganan gangguan, serta mendukung peningkatan keandalan dan keselamatan sistem transmisi secara keseluruhan.

2.1.6 Cuaca sebagai Faktor Gangguan

Kondisi cuaca memiliki pengaruh besar terhadap keandalan sistem transmisi. Petir, hujan lebat, kabut, dan angin kencang sering kali menjadi penyebab gangguan hubung singkat atau kerusakan isolator. Oleh karena itu, informasi cuaca di sekitar tower suspect penting untuk membantu analisis penyebab gangguan serta menentukan metode penanganan yang tepat.

Gangguan pada saluran transmisi memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan gangguan pada sistem distribusi. Pada jaringan SUTT dan SUTET, panjang saluran yang mencapai puluhan hingga ratusan kilometer menyebabkan estimasi lokasi gangguan menjadi tantangan tersendiri. Rele jarak mampu memperkirakan lokasi gangguan berdasarkan perubahan impedansi, tetapi hasil estimasi tersebut tetap dipengaruhi oleh kondisi sistem secara keseluruhan.

Gangguan akibat petir, misalnya, sering bersifat temporer dan dapat menyebabkan gangguan sesaat yang berhasil dipulihkan melalui mekanisme auto reclose. Dalam kasus seperti ini, estimasi jarak gangguan mungkin berada dalam zona tertentu tanpa adanya kerusakan permanen pada peralatan. Sebaliknya, gangguan akibat pohon yang menyentuh konduktor atau isolator retak cenderung bersifat permanen dan memerlukan tindakan langsung di lapangan.

Perbedaan karakteristik gangguan ini menunjukkan bahwa informasi jarak gangguan harus dikombinasikan dengan data operasional lainnya untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, integrasi data dalam aplikasi menjadi penting untuk membantu petugas dalam menginterpretasikan hasil estimasi rele jarak.

Keandalan sistem transmisi tidak hanya ditentukan oleh kualitas peralatan proteksi dan konstruksi jaringan, tetapi juga oleh kecepatan dan ketepatan informasi dalam proses penanganan gangguan. Informasi yang lambat atau tidak lengkap dapat menyebabkan keterlambatan dalam penanganan dan memperpanjang durasi pemadaman.

Dalam konteks operasional, waktu merupakan faktor kritis. Semakin cepat lokasi gangguan diidentifikasi, semakin cepat pula proses inspeksi dan perbaikan dapat dilakukan. Dengan demikian, sistem informasi yang terintegrasi berperan sebagai faktor pendukung keandalan sistem secara tidak langsung. Aplikasi yang mampu menyajikan data teknis tower, informasi petugas, serta kondisi cuaca dalam satu tampilan membantu mengurangi waktu yang diperlukan untuk mencari informasi secara terpisah.

Aplikasi DETEKSI dilengkapi dengan integrasi Application Programming Interface (API) cuaca untuk memperoleh informasi kondisi lingkungan di sekitar lokasi tower suspect secara real-time. Informasi cuaca yang ditampilkan meliputi kondisi hujan, suhu, kelembaban, dan potensi petir.

Integrasi data cuaca ini bertujuan untuk memberikan informasi pendukung dalam analisis penyebab gangguan. Faktor lingkungan seperti hujan lebat, petir, dan kelembaban

tinggi merupakan penyebab umum gangguan temporer pada sistem transmisi, terutama pada isolator dan konduktor.

Dengan adanya informasi cuaca yang terintegrasi, petugas lapangan dapat melakukan persiapan yang lebih baik sebelum melakukan inspeksi, serta memperkirakan kemungkinan gangguan berulang. Integrasi API cuaca ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dan berbasis data.

2.2 Studi Literatur

Penelitian terdahulu banyak membahas aplikasi monitoring transmisi berbasis GIS, smart grid, serta *fault location system*. Namun, sebagian besar masih fokus pada visualisasi lokasi gangguan tanpa integrasi detail data tower dan ground patrol. Penelitian ini memberikan inovasi dengan menyatukan data teknis tower, proteksi, cuaca, dan operasional lapangan dalam satu aplikasi yang sederhana dan cepat digunakan oleh petugas.

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh gambaran mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem transmisi tenaga listrik, gangguan pada saluran transmisi, rele jarak, serta penerapan sistem informasi dan aplikasi dalam mendukung operasi ketenagalistrikan. Kajian terhadap penelitian sebelumnya bertujuan untuk mengidentifikasi pendekatan yang telah digunakan, kelebihan dan keterbatasannya, serta posisi penelitian ini dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan keandalan sistem transmisi tidak selalu harus dilakukan melalui penggantian peralatan atau peningkatan kapasitas jaringan. Integrasi sederhana antara sistem proteksi dan sistem informasi operasional dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi kerja.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini menekankan pada solusi aplikatif yang sesuai dengan kebutuhan operasional di lapangan. Hal ini membuktikan bahwa inovasi dalam bidang teknologi listrik dapat dilakukan melalui integrasi teknologi informasi tanpa harus menggunakan sistem yang kompleks atau mahal.

Beberapa penelitian terdahulu membahas kinerja dan koordinasi rele jarak pada saluran transmisi tegangan tinggi. Penelitian oleh Zalmahdi Syamsudin dkk. menekankan bahwa rele jarak merupakan proteksi utama pada sistem transmisi 150 kV yang mampu memberikan

informasi jarak gangguan secara cepat. Namun, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa informasi jarak gangguan masih memerlukan proses lanjutan untuk mengidentifikasi lokasi fisik gangguan di lapangan, sehingga waktu penanganan gangguan masih bergantung pada koordinasi manual.

Penelitian lain yang membahas evaluasi kinerja dan keandalan rele jarak, seperti yang dilakukan oleh Blancira (2025) dan Suhartini (2015), menunjukkan bahwa keakuratan setting rele jarak sangat berpengaruh terhadap keandalan sistem transmisi. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut lebih berfokus pada aspek teknis proteksi dan belum membahas integrasi informasi proteksi dengan data teknis tower dan data operasional petugas lapangan. Dalam konteks sistem pendukung penentuan lokasi gangguan, beberapa penelitian internasional mengkaji metode estimasi lokasi gangguan menggunakan pendekatan berbasis pemrosesan citra dan machine learning. Budak dan Akbal (2020; 2021) menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi komputasi dapat meningkatkan akurasi estimasi lokasi gangguan pada saluran transmisi. Namun, pendekatan tersebut umumnya membutuhkan sistem komputasi yang kompleks dan belum secara langsung terintegrasi dengan kebutuhan operasional harian petugas transmisi.

Selain penelitian yang berfokus pada proteksi dan estimasi gangguan, terdapat pula penelitian yang menyoroti pentingnya integrasi sistem informasi dalam operasi ketenagalistrikan. Darmana dkk. (2020) menyatakan bahwa integrasi data teknis dan operasional dalam satu sistem terpusat mampu meningkatkan efisiensi kerja dan mempercepat pengambilan keputusan pada sistem energi. Hal ini diperkuat oleh Darmana dan Koerniawan (2019) yang menekankan bahwa sistem informasi berbasis aplikasi dapat menjadi alat bantu strategis dalam mendukung operasi dan pengelolaan infrastruktur energi. Penelitian terkait pemanfaatan aplikasi dan teknologi informasi dalam sektor energi juga menunjukkan bahwa sistem yang sederhana, mudah digunakan, dan fleksibel lebih berpotensi untuk diterapkan secara luas di lingkungan operasional. Darmana (2024) dalam penelitiannya mengenai integrasi sistem energi dan pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan menegaskan bahwa inovasi berbasis aplikasi memiliki peran penting dalam mendukung transformasi digital di sektor ketenagalistrikan.

Berdasarkan hasil kajian literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian-

penelitian sebelumnya telah banyak membahas aspek proteksi transmisi, kinerja rele jarak, serta pengembangan sistem informasi dalam sektor energi. Namun, masih terdapat celah penelitian terkait pengembangan aplikasi yang secara langsung mengintegrasikan informasi jarak gangguan dari rele jarak dengan data teknis tower, data ground patrol, serta informasi cuaca dalam satu sistem yang sederhana dan aplikatif.

Oleh karena itu, tugas akhir ini hadir sebagai upaya untuk mengisi celah tersebut dengan merancang aplikasi yang mampu mengolah informasi jarak gangguan menjadi data lokasi tower suspect secara otomatis. Aplikasi ini tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu teknis, tetapi juga sebagai sistem pendukung keputusan operasional yang dapat mempercepat penanganan gangguan dan meningkatkan keandalan sistem transmisi tenaga listrik di wilayah kerja PT PLN (Persero) UPT Palembang.

Sistem proteksi merupakan bagian fundamental dalam sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk mendeteksi gangguan serta mengisolasi bagian sistem yang mengalami gangguan dengan cepat dan selektif. Pada jaringan transmisi tegangan tinggi, sistem proteksi dirancang untuk bekerja dalam waktu yang sangat singkat guna mencegah kerusakan peralatan dan menjaga stabilitas sistem secara keseluruhan.

Literatur mengenai proteksi transmisi menekankan pentingnya prinsip selektivitas, sensitivitas, kecepatan, dan keandalan. Selektivitas memastikan bahwa hanya bagian sistem yang terganggu yang diputus, tanpa mempengaruhi bagian lain yang masih normal. Sensitivitas berkaitan dengan kemampuan sistem mendeteksi gangguan kecil sekalipun. Kecepatan proteksi sangat menentukan besarnya dampak gangguan terhadap sistem, sementara keandalan mencerminkan konsistensi sistem dalam bekerja sesuai perencanaan.

Rele jarak merupakan salah satu bentuk proteksi utama pada saluran transmisi. Dalam berbagai penelitian, rele jarak dikenal memiliki keunggulan dalam mendeteksi lokasi gangguan berdasarkan impedansi saluran. Konsep dasar yang digunakan adalah bahwa impedansi saluran sebanding dengan panjang saluran. Oleh karena itu, perubahan impedansi akibat gangguan dapat digunakan untuk memperkirakan jarak gangguan dari titik pemasangan rele.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa akurasi rele jarak dipengaruhi oleh parameter sistem seperti impedansi saluran, resistansi gangguan, serta konfigurasi jaringan. Hal ini menjelaskan mengapa informasi jarak gangguan yang dihasilkan oleh rele jarak bersifat estimasi dan memerlukan verifikasi lapangan.

Dalam literatur teknik tenaga listrik, terdapat berbagai metode estimasi lokasi gangguan pada saluran transmisi. Secara umum, metode tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu metode berbasis impedansi dan metode berbasis gelombang berjalan (*traveling wave*).

Metode berbasis impedansi merupakan metode yang paling umum digunakan dan menjadi dasar kerja rele jarak. Metode ini menghitung rasio tegangan dan arus untuk memperoleh impedansi yang kemudian dikonversi menjadi jarak. Keunggulan metode ini adalah kesederhanaannya dan kemudahan implementasi pada sistem proteksi.

Sementara itu, metode berbasis gelombang berjalan menggunakan prinsip perambatan gelombang gangguan pada saluran transmisi. Metode ini umumnya memiliki akurasi lebih tinggi, tetapi memerlukan perangkat pengukuran yang lebih kompleks serta sinkronisasi waktu yang presisi.

Beberapa penelitian modern juga mengembangkan metode berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi estimasi lokasi gangguan. Algoritma pembelajaran mesin digunakan untuk menganalisis pola gangguan berdasarkan data historis. Meskipun metode ini menunjukkan potensi yang menjanjikan, penerapannya masih terbatas karena membutuhkan data besar dan infrastruktur komputasi yang memadai.

Dalam konteks penelitian ini, pendekatan yang digunakan tidak menggantikan metode estimasi gangguan pada rele jarak, tetapi memanfaatkan hasil estimasi tersebut untuk diintegrasikan dengan data operasional lapangan.

Transformasi digital dalam sistem tenaga listrik telah menjadi fokus berbagai penelitian dalam satu dekade terakhir. Digitalisasi mencakup pemanfaatan teknologi informasi untuk meningkatkan efisiensi, transparansi, dan kecepatan pengambilan keputusan.

Literatur menunjukkan bahwa digitalisasi pada sistem tenaga dapat meningkatkan keandalan dan mengurangi biaya operasional. Implementasi sistem berbasis data memungkinkan pemantauan kondisi peralatan secara real-time serta analisis histori gangguan untuk mendukung pemeliharaan preventif.

Namun demikian, sebagian besar penelitian digitalisasi masih berfokus pada sistem pembangkitan dan distribusi. Integrasi digital pada level operasional transmisi, khususnya dalam proses identifikasi lokasi gangguan, masih relatif terbatas. Hal ini menunjukkan adanya peluang penelitian untuk mengembangkan sistem pendukung informasi yang sederhana namun aplikatif pada unit transmisi.

Sistem informasi operasional memiliki peran penting dalam mendukung proses pengambilan keputusan di sektor industri, termasuk ketenagalistrikan. Informasi yang akurat dan cepat memungkinkan manajemen dan operator melakukan tindakan yang tepat dalam waktu singkat.

Dalam konteks transmisi tenaga listrik, informasi lokasi gangguan menjadi dasar utama dalam menentukan langkah penanganan. Tanpa sistem informasi yang terintegrasi, proses pencarian data dapat memakan waktu dan meningkatkan risiko kesalahan.

Penelitian di bidang sistem informasi menunjukkan bahwa integrasi data dalam satu platform dapat meningkatkan efisiensi kerja serta mengurangi beban administratif. Hal ini relevan dengan pengembangan aplikasi dalam penelitian ini yang bertujuan untuk menyederhanakan alur identifikasi lokasi gangguan.

Perkembangan perangkat bergerak (mobile device) telah membuka peluang baru dalam sistem operasional industri. Aplikasi berbasis Android banyak digunakan sebagai alat bantu monitoring, inspeksi, dan pelaporan lapangan.

Literatur menunjukkan bahwa penggunaan aplikasi mobile dalam sistem industri dapat meningkatkan fleksibilitas kerja serta mempercepat akses informasi. Keunggulan utama aplikasi mobile terletak pada kemudahan penggunaan dan portabilitasnya.

Dalam sektor ketenagalistrikan, aplikasi mobile telah digunakan untuk monitoring gardu distribusi, inspeksi jaringan, dan pencatatan gangguan. Namun demikian,

penggunaan aplikasi mobile untuk integrasi estimasi jarak gangguan dengan database tower transmisi masih jarang dibahas secara spesifik.

Penelitian ini memperluas penerapan aplikasi mobile pada konteks transmisi dengan mengintegrasikan data proteksi dan data operasional dalam satu sistem.

Konsep smart grid menekankan pada integrasi komunikasi dua arah, otomatisasi, dan analisis data dalam sistem tenaga listrik. Smart grid tidak hanya berfokus pada pembangkitan energi terbarukan, tetapi juga pada efisiensi operasi dan pemeliharaan jaringan.

Literatur smart grid menunjukkan bahwa pengelolaan data menjadi komponen utama dalam sistem tenaga modern. Data yang diperoleh dari berbagai sumber seperti sensor, proteksi, dan sistem monitoring perlu diintegrasikan untuk menghasilkan informasi yang bernilai.

Aplikasi yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat dipandang sebagai langkah awal menuju integrasi data pada level operasional transmisi. Meskipun belum sepenuhnya terhubung dengan sistem smart grid, pendekatan integrasi data yang digunakan sejalan dengan prinsip dasar smart grid.

Beberapa penelitian dalam bidang keselamatan kerja dan sistem tenaga menunjukkan bahwa human error merupakan salah satu faktor signifikan dalam terjadinya keterlambatan atau kesalahan operasional. Pada situasi gangguan, tekanan kerja dan kebutuhan respon cepat dapat meningkatkan risiko kesalahan interpretasi data.

Penggunaan sistem otomatis untuk melakukan perhitungan dan pencocokan data dapat mengurangi beban kognitif operator serta meningkatkan akurasi informasi awal. Literatur mendukung bahwa otomatisasi proses sederhana dapat meningkatkan efisiensi tanpa mengurangi peran manusia sebagai pengambil keputusan akhir.

Keandalan sistem transmisi merupakan aspek penting dalam sistem tenaga listrik. Literatur mengenai indeks keandalan seperti SAIDI dan SAIFI menunjukkan bahwa durasi pemadaman memiliki dampak langsung terhadap kualitas pelayanan energi.

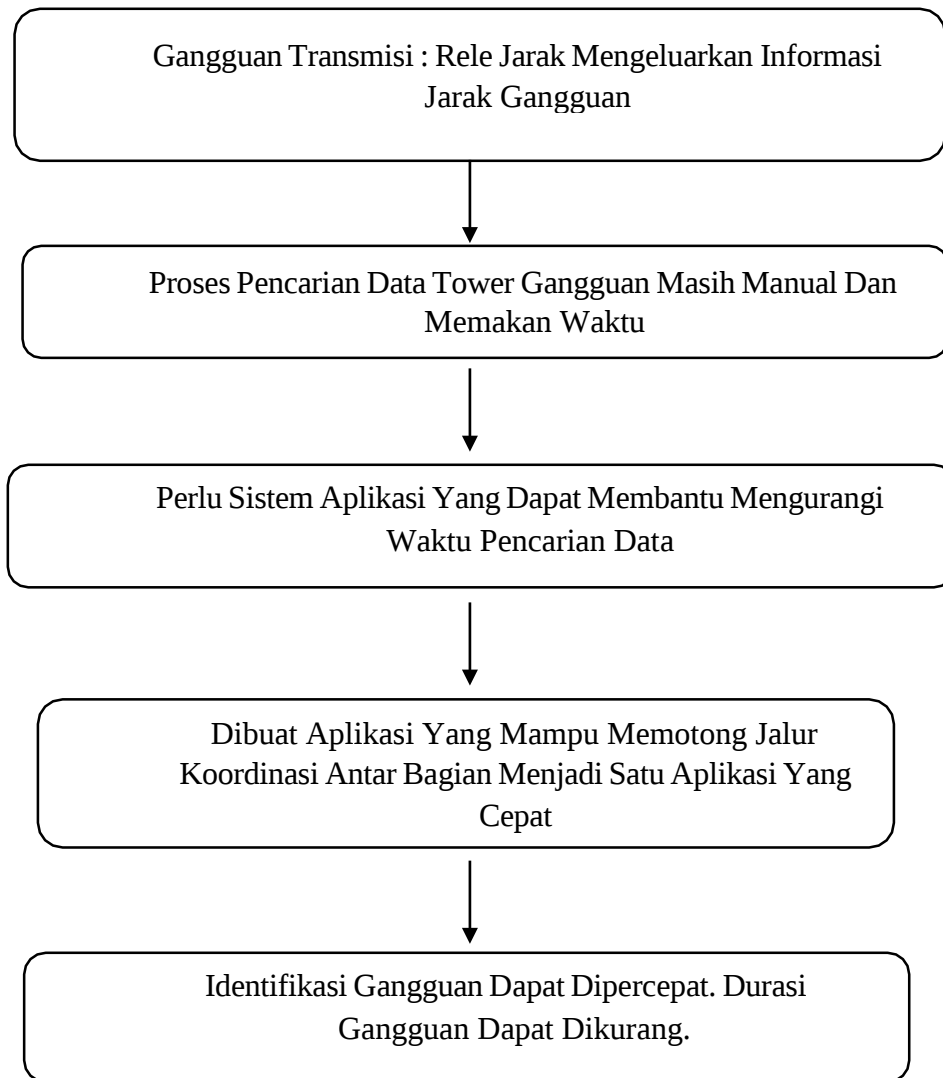
Meskipun penelitian ini tidak secara langsung mengurangi frekuensi gangguan, percepatan identifikasi lokasi gangguan berpotensi mengurangi durasi pemadaman. Dengan demikian, penelitian ini memiliki relevansi terhadap peningkatan performa keandalan sistem secara tidak langsung.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Rele jarak efektif dalam mendeteksi dan memperkirakan lokasi gangguan.
2. Metode estimasi gangguan terus berkembang, namun integrasi dengan sistem operasional masih terbatas.
3. Digitalisasi dan integrasi data menjadi tren utama dalam sistem tenaga modern.
4. Aplikasi mobile memiliki potensi besar dalam mendukung operasional lapangan.

Penelitian ini menempatkan diri pada irisan antara sistem proteksi dan sistem informasi operasional dengan pendekatan aplikatif. Dengan demikian, kontribusi penelitian tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga sistemik dalam konteks integrasi data dan efisiensi operasional.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 4 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran pada tugas akhir ini disusun untuk menggambarkan alur logis hubungan antara permasalahan yang terjadi di lapangan, landasan teori yang digunakan, solusi yang ditawarkan, hingga hasil yang diharapkan dari penelitian. Kerangka pemikiran ini menjadi dasar dalam perancangan dan pengembangan aplikasi untuk percepatan informasi titik lokasi gangguan pada penghantar SUTT dan SUTET di wilayah kerja PT PLN (Persero) UPT Palembang.

Permasalahan utama yang melatarbelakangi penelitian ini adalah lamanya proses identifikasi lokasi gangguan pada sistem transmisi. Meskipun rele jarak (distance relay) mampu memberikan informasi jarak gangguan secara cepat, informasi tersebut masih berupa data numerik dan belum terhubung secara langsung dengan data fisik tower di lapangan. Akibatnya, petugas masih harus melakukan pencarian data tower secara manual melalui dokumen atau koordinasi antarbagian, sehingga memperlambat proses penanganan gangguan.

Berdasarkan landasan teori mengenai sistem transmisi tenaga listrik, gangguan transmisi, dan prinsip kerja rele jarak, diketahui bahwa kecepatan penanganan gangguan sangat bergantung pada ketersediaan informasi yang akurat dan mudah diakses. Selain itu, teori mengenai sistem informasi dan digitalisasi operasional menunjukkan bahwa integrasi data dalam satu platform dapat meningkatkan efisiensi kerja dan mempercepat pengambilan keputusan.

Mengacu pada hasil studi literatur, penelitian-penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada aspek teknis proteksi dan evaluasi kinerja rele jarak, namun belum banyak mengkaji pengembangan aplikasi yang mengintegrasikan informasi proteksi dengan data teknis tower dan data operasional lapangan. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian yang dapat diisi melalui pengembangan sistem aplikasi yang bersifat praktis dan aplikatif.

Berdasarkan permasalahan dan kajian teori tersebut, solusi yang ditawarkan dalam tugas akhir ini adalah perancangan aplikasi DETEKSI (Data Elektronik Terpadu untuk Kendali dan Sistem Investigasi). Aplikasi ini dirancang untuk mengolah input jarak

gangguan dari rele jarak dan menghubungkannya secara otomatis dengan database tower transmisi. Dengan demikian, aplikasi mampu menampilkan informasi tower suspect secara cepat dan terintegrasi.

Aplikasi DETEKSI tidak hanya menyajikan data teknis tower, tetapi juga dilengkapi dengan informasi pendukung seperti tipe isolator, data proteksi, nama petugas ground patrol, serta kondisi cuaca di sekitar lokasi tower. Integrasi informasi ini diharapkan dapat memotong jalur koordinasi manual antarbagian dan mempercepat pengambilan keputusan operasional.

Melalui penerapan aplikasi tersebut, diharapkan proses identifikasi lokasi gangguan pada penghantar SUTT dan SUTET dapat dilakukan secara lebih cepat, efisien, dan terstruktur. Dampak yang diharapkan dari kerangka pemikiran ini adalah berkurangnya waktu penanganan gangguan, meningkatnya keandalan sistem transmisi, serta mendukung upaya digitalisasi operasional di lingkungan PT PLN (Persero) UPT Palembang.

2.4 Digitalisasi Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Perkembangan teknologi informasi dalam sektor ketenagalistrikan telah mendorong terjadinya transformasi digital pada sistem transmisi tenaga listrik. Digitalisasi tidak hanya mencakup penggunaan sistem proteksi berbasis mikroprosesor, tetapi juga integrasi data operasional dalam platform berbasis teknologi informasi.

Pada sistem transmisi modern, data operasional seperti arus, tegangan, status PMT, gangguan, serta histori kejadian tersimpan dalam sistem digital seperti SCADA dan sistem monitoring lainnya. Namun demikian, dalam praktik operasional di lapangan, masih terdapat tahapan kerja yang dilakukan secara manual, terutama pada proses identifikasi lokasi gangguan berdasarkan jarak yang diberikan oleh rele jarak.

Digitalisasi pada aspek identifikasi lokasi gangguan menjadi penting karena:

1. Mengurangi ketergantungan pada dokumen fisik
2. Mempercepat akses informasi
3. Meningkatkan akurasi pengambilan keputusan
4. Mendukung dokumentasi histori gangguan

Aplikasi yang dirancang dalam penelitian ini merupakan bagian dari upaya digitalisasi pada level operasional, khususnya dalam mengintegrasikan data proteksi dan data tower transmisi. Keberlanjutan sistem menjadi faktor penting dalam implementasi teknologi baru. Sistem yang dirancang harus mudah diperbarui, mudah dikembangkan, dan tidak bergantung pada satu individu pengembang. Struktur database yang sederhana serta penggunaan platform yang mudah dipahami memungkinkan aplikasi ini untuk dikembangkan lebih lanjut oleh unit transmisi lainnya.

Keberlanjutan juga mencakup aspek pembaruan data tower dan data operasional secara berkala. Tanpa pembaruan data yang konsisten, akurasi sistem dapat menurun. Oleh karena itu, manajemen data menjadi bagian penting dalam keberhasilan implementasi sistem ini.

2.5 Karakteristik Gangguan pada SUTT dan SUTET

Gangguan pada saluran transmisi memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan gangguan pada sistem distribusi. Pada jaringan SUTT dan SUTET, panjang saluran yang mencapai puluhan hingga ratusan kilometer menyebabkan estimasi lokasi gangguan menjadi tantangan tersendiri. Rele jarak mampu memperkirakan lokasi gangguan berdasarkan perubahan impedansi, tetapi hasil estimasi tersebut tetap dipengaruhi oleh kondisi sistem secara keseluruhan.

Gangguan akibat petir, misalnya, sering bersifat temporer dan dapat menyebabkan gangguan sesaat yang berhasil dipulihkan melalui mekanisme auto reclose. Dalam kasus seperti ini, estimasi jarak gangguan mungkin berada dalam zona tertentu tanpa adanya kerusakan permanen pada peralatan. Sebaliknya, gangguan akibat pohon yang menyentuh konduktor atau isolator retak cenderung bersifat permanen dan memerlukan tindakan langsung di lapangan.

Perbedaan karakteristik gangguan ini menunjukkan bahwa informasi jarak gangguan harus dikombinasikan dengan data operasional lainnya untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, integrasi data dalam aplikasi menjadi penting untuk membantu petugas dalam menginterpretasikan hasil estimasi rele jarak.