

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Induk Rantau

Gardu Induk Rantau yang berada di kabupaten tapin merupakan salah satu elemen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai pusat pengaturan, pengendalian, dan penyaluran energi listrik dari sistem transmisi menuju sistem distribusi atau antar tingkat tegangan. Keandalan operasi Gardu Induk Rantau sangat menentukan kontinuitas penyaluran energi listrik, karena gangguan yang terjadi pada Gardu Induk Rantau dapat berdampak langsung pada luas wilayah pemadaman dan kualitas pelayanan tenaga listrik. [3]

Di dalam Gardu Induk terdapat berbagai peralatan utama seperti busbar, pemutus tenaga, pemisah, transformator daya, serta peralatan proteksi dan pengukuran. Seluruh peralatan tersebut saling terhubung melalui sambungan listrik yang harus mampu menghantarkan arus listrik dalam jumlah besar secara kontinu. Oleh karena itu, kondisi sambungan listrik menjadi faktor krusial dalam menjaga keandalan dan *efisiensi* sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Kondisi sambungan yang tidak baik dapat menyebabkan terjadinya peningkatan tahanan listrik pada titik tertentu, yang selanjutnya menimbulkan kenaikan temperatur dan berpotensi menyebabkan kerusakan peralatan apabila tidak segera ditangani.

Gardu Induk 150 kV yang ditinjau pada penelitian ini memiliki konfigurasi sistem dengan total 5 bay, yang terdiri dari 2 bay line, 2 bay transformator, dan 1 bay coupler. Konfigurasi ini dirancang untuk menjamin kontinuitas pelayanan serta meningkatkan fleksibilitas operasi sistem tenaga listrik.

Bay line terdiri dari dua penyulang transmisi 150 kV yang terhubung ke jaringan saluran udara tegangan tinggi (OHL), yaitu jalur Barikin dan jalur Cempaka. Kedua bay ini berfungsi sebagai jalur masuk dan keluar daya dari sistem transmisi menuju gardu induk. Pada masing-masing bay line dilengkapi dengan peralatan utama seperti PMT (Pemutus Tenaga), PMS (Pemisah), CT (Current Transformer), dan PT/CVT (Potential Transformer) yang berfungsi untuk proteksi, pengukuran, serta pengamanan sistem

Gardu induk ini memiliki dua bay transformator yang menghubungkan sistem 150 kV ke sisi tegangan menengah 20 kV melalui transformator daya 150/20 kV. Bay trafo berfungsi sebagai penyalur daya dari sistem transmisi ke sistem distribusi. Masing-masing bay trafo dilengkapi sistem proteksi arus lebih, diferensial transformator, serta pengukuran arus dan tegangan guna menjaga keandalan operasi.

Transformator daya berperan dalam menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 20 kV sebelum disalurkan ke jaringan distribusi. Keberadaan dua unit transformator memberikan keuntungan dalam hal pembagian beban dan meningkatkan keandalan sistem apabila salah satu unit mengalami gangguan atau pemeliharaan.

Bay coupler berfungsi sebagai penghubung antara Busbar I dan Busbar II. Sistem ini memungkinkan pengalihan beban antar busbar tanpa memadamkan seluruh sistem. Dengan adanya bus coupler, pemeliharaan peralatan pada salah satu bus dapat dilakukan tanpa mengganggu kontinuitas penyaluran daya secara keseluruhan. Konfigurasi ini termasuk dalam kategori double busbar dengan single breaker.

2.1.2 Sambungan Listrik pada Peralatan Gardu Induk Rantau

Sambungan listrik pada peralatan Gardu Induk Rantau berfungsi sebagai titik temu antar konduktor dalam menyalurkan arus listrik. Sambungan ini dapat berupa sambungan baut, clamp, maupun terminal konduktor yang secara mekanis harus kuat dan secara elektrik harus memiliki hambatan sekecil mungkin.[4]



Gambar. 2.2 Sambungan Clamp PMS Bus[4]

Dalam kondisi ideal, sambungan listrik memiliki tekanan mekanis yang cukup sehingga luas permukaan kontak efektif menjadi besar. Namun, selama masa operasi jangka panjang, sambungan dapat mengalami penurunan kualitas akibat berbagai faktor, seperti getaran mekanis, perubahan suhu lingkungan, korosi, oksidasi permukaan konduktor, serta proses pemuatan dan penyusutan material.

Penurunan tekanan kontak dan degradasi permukaan konduktor akan mengurangi luas kontak efektif. Kondisi ini menyebabkan arus listrik mengalir melalui area kontak yang lebih kecil, sehingga meningkatkan nilai tahanan kontak. Apabila kondisi tersebut dibiarkan, sambungan listrik akan menjadi titik lemah yang memicu terjadinya rugi-rugi daya dan kenaikan temperatur lokal.

2.1.3 Tahanan Kontak

Tahanan kontak adalah hambatan listrik yang muncul pada pertemuan dua permukaan konduktor yang saling bersentuhan. Nilai tahanan kontak tidak hanya dipengaruhi oleh jenis material konduktor, tetapi juga oleh kondisi fisik permukaan kontak, tekanan mekanis, kebersihan permukaan, serta kondisi lingkungan operasi[5]

Secara *mikroskopis*, permukaan konduktor memiliki tingkat kekasaran

tertentu sehingga kontak listrik sebenarnya hanya terjadi pada titik-titik kecil permukaan konduktor. Semakin kecil tekanan mekanis atau semakin buruk kondisi permukaan kontak, maka jumlah titik kontak efektif akan berkurang. Akibatnya, nilai tahanan kontak akan meningkat.

Pada peralatan Gardu Induk Rantau yang membawa arus besar, peningkatan tahanan kontak meskipun dalam nilai yang relatif kecil dapat menimbulkan dampak yang signifikan. Hal ini disebabkan karena energi listrik yang hilang akibat tahanan tersebut akan terkonversi menjadi energi panas.

Untuk mengetahui kondisi sambungan secara *kuantitatif*, dilakukan pengujian tahanan kontak menggunakan alat ukur khusus berupa *micro-ohmmeter* atau *Digital Low Resistance Ohmmeter* (DLRO). Pengujian ini dilakukan dengan metode empat kawat (*four point method*) untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat dan meminimalkan pengaruh tahanan kabel ukur. Hasil pengukuran tahanan kontak kemudian digunakan sebagai indikator kualitas sambungan dan sebagai dasar evaluasi kondisi peralatan listrik di Gardu Induk Rantau.



Gambar 2.3 Megger DLRO600 Low Resistance Ohmmeter[5]

2.1.4 *Hotspot* pada Peralatan Listrik

Hotspot merupakan kondisi kenaikan temperatur lokal yang terjadi pada titik tertentu peralatan listrik akibat adanya disipasi energi listrik dalam bentuk panas. Pada Gardu Induk Rantau, *hotspot* umumnya ditemukan pada sambungan konduktor, serta kontak peralatan switching seperti PMS dan PMT.[5]



Gambar 2.4 *Hotspot* Peralatan[5]

Kenaikan temperatur pada *hotspot* terjadi ketika energi panas yang dihasilkan akibat rugi-rugi daya lebih besar dibandingkan dengan kemampuan pelepasan panas ke lingkungan sekitar. Apabila kondisi ini berlangsung secara terus-menerus, maka temperatur pada titik sambungan akan meningkat secara progresif dan berpotensi mempercepat degradasi material konduktor maupun isolasi. *Hotspot* sering digunakan sebagai indikator awal adanya permasalahan pada sambungan listrik, khususnya yang berkaitan dengan peningkatan tahanan kontak. Untuk mendeteksi keberadaan hotspot, dilakukan pengujian menggunakan kamera termal (*thermal imaging camera*) yang mampu memvisualisasikan distribusi

temperatur pada peralatan listrik secara non-kontak. Data temperatur yang diperoleh kemudian dikorelasikan dengan hasil pengukuran tahanan kontak untuk memastikan penyebab utama terjadinya *hotspot*



Gambar 2.5 FLIR *Camera Thermal*[5]

Apabila tidak segera dilakukan tindakan perbaikan, *hotspot* dapat menyebabkan penurunan kekuatan mekanis konduktor, kerusakan isolasi, hingga kegagalan peralatan yang berdampak pada terganggunya operasi sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, pengujian tahanan kontak dan inspeksi *termal* menjadi bagian penting dalam pemeliharaan *preventif* dan *prediktif* pada peralatan Gardu Induk.

2.1.5 Rugi Daya (*Losses*) Akibat Tahanan Kontak

Rugi daya merupakan energi listrik yang hilang selama proses penyaluran daya akibat adanya hambatan listrik. Pada sambungan peralatan Gardu Induk Rantau, rugi daya terutama disebabkan oleh tahanan kontak yang dilalui oleh arus listrik.[6]

Secara teoritis, rugi daya akibat tahanan kontak dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{Loss} = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.1)$$

keterangan

P_{Loss} = rugi daya (Watt)

I = arus yang mengalir (Ampere)

R = tahanan kontak (Ohm)

di mana P_{Loss} adalah rugi daya, I adalah arus listrik, dan R adalah tahanan kontak. Persamaan ini menunjukkan bahwa rugi-rugi daya meningkat secara kuadrat terhadap arus listrik, sehingga pada peralatan gardu induk yang beroperasi dengan arus besar, peningkatan kecil pada nilai tahanan kontak dapat menghasilkan rugi daya yang cukup besar.

Rugi daya tersebut tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga menjadi sumber utama kenaikan temperatur pada titik sambungan yang memicu terjadinya *hotspot*

2.1.6 Hubungan Tahanan Kontak, *Hotspot*, dan *Losses*

Secara teoritis, terdapat hubungan sebab-akibat yang sangat erat antara tahanan kontak, *hotspot*, dan rugi-rugi daya. Peningkatan tahanan kontak akan menyebabkan meningkatnya rugi daya pada titik sambungan. Energi listrik yang hilang tersebut kemudian terdisipasi dalam bentuk panas, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur lokal.[7]

Apabila kenaikan temperatur ini tidak dikendalikan, maka akan terbentuk *hotspot* pada sambungan peralatan. Sebaliknya, penurunan tahanan kontak melalui tindakan perbaikan akan menurunkan rugi-rugi daya dan temperatur operasi, sehingga *hotspot* dapat dikurangi atau dihilangkan.

Apabila kenaikan temperatur ini tidak dikendalikan, maka akan terbentuk *hotspot* pada sambungan peralatan. Sebaliknya, penurunan tahanan kontak melalui tindakan perbaikan akan menurunkan rugi daya dan temperatur operasi, sehingga *hotspot* dapat dikurangi atau dihilangkan.

2.1.7 Perbaikan *Hotspot* Sebagai Bagian Dari Pemeliharaan

Perbaikan *hotspot* merupakan bagian dari kegiatan pemeliharaan peralatan Gardu Induk Rantau yang bertujuan untuk mengembalikan kondisi sambungan listrik agar berada pada kondisi optimal. Tindakan perbaikan umumnya meliputi pengencangan sambungan, pembersihan oksidasi pada permukaan kontak, serta penggantian komponen sambungan yang telah mengalami *degradasi*. [8]

Melalui perbaikan tersebut, nilai tahanan kontak dapat diturunkan sehingga rugi daya dan temperatur operasi sambungan ikut berkurang. Dengan demikian, perbaikan *hotspot* tidak hanya berfungsi untuk mencegah kegagalan peralatan, tetapi juga untuk meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik dan mengurangi pemborosan energi dalam jangka panjang.

2.1.8 Peralatan *Switchgear*

a. Pemutus (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan utama pada Gardu Induk yang berfungsi untuk memutus dan menghubungkan arus listrik baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. PMT memiliki peran penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik karena mampu memutus arus gangguan dalam waktu yang sangat singkat. [3]



Gambar 2. 6 Pemutus Tenaga (PMT)[3]

PMT bekerja dengan memutuskan rangkaian listrik ketika menerima perintah trip dari sistem proteksi. Pada saat terjadi gangguan seperti hubung singkat, arus lebih, atau gangguan tanah, relay proteksi akan mendeteksi ketidaknormalan tersebut dan mengirimkan sinyal ke PMT untuk membuka kontak sehingga aliran arus dapat dihentikan.

Dalam proses pemutusan arus, akan timbul busur api (*arc*) akibat pemisahan kontak. Oleh karena itu, PMT dilengkapi dengan media pemadam busur api, seperti minyak, udara tekan, vakum, atau gas SF₆, tergantung pada jenis PMT yang digunakan. Media tersebut berfungsi untuk memadamkan busur api dengan cepat agar tidak merusak peralatan.

Gangguan atau kegagalan operasi PMT dapat menyebabkan meluasnya gangguan pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, diperlukan kegiatan inspeksi dan pemeliharaan

secara rutin untuk memastikan PMT dapat bekerja sesuai standar operasi. Inspeksi meliputi pemeriksaan *visual*, mekanisme kerja, tekanan gas atau media pemadam, serta sistem kontrol.

b. Pemisah Bus (PMS Bus)

Pemisah Bus (PMS Bus) merupakan salah satu jenis pemisah pada Gardu Induk yang berfungsi untuk menghubungkan atau memisahkan peralatan dengan busbar. PMS Bus digunakan untuk keperluan manuver sistem, pemeliharaan peralatan, serta pengaturan konfigurasi jaringan tanpa mengganggu keselamatan operasi pms merupakan suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik.[9]



Gambar 2. 7 Pemisah Bus (PMS Bus)[9]

PMS Bus tidak dirancang untuk memutus arus berbeban. Oleh karena itu, pengoperasian PMS Bus hanya dilakukan setelah arus terlebih dahulu diputus oleh pemutus tenaga (PMT). Setelah PMT membuka rangkaian, PMS Bus dapat dioperasikan untuk memberikan pemisahan mekanis dan visual antara peralatan dan busbar.

Dalam konfigurasi Gardu Induk, PMS Bus berperan penting dalam pengaturan aliran daya. Dengan pengoperasian PMS Bus, suatu peralatan dapat dipindahkan dari satu busbar ke busbar lainnya, misalnya pada sistem double busbar, sehingga *fleksibilitas* dan keandalan sistem dapat ditingkatkan.

Secara konstruksi, PMS Bus dilengkapi dengan kontak tetap dan kontak bergerak yang dioperasikan secara manual maupun menggunakan motor listrik. Selain itu, PMS Bus biasanya dilengkapi dengan sistem *interlock* untuk mencegah kesalahan operasi, seperti membuka PMS saat masih berbeban.

Keandalan PMS Bus sangat bergantung pada kondisi mekanis, kekuatan kontak, serta kondisi isolator. Gangguan seperti korosi, keausan kontak, atau ketidaksejajaran mekanisme dapat menghambat proses manuver sistem. Oleh karena itu, inspeksi dan pemeliharaan PMS Bus perlu dilakukan secara berkala.

2.1.9 Pemeliharaan (*Maintenance*)

Pemeliharaan merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk menjaga agar peralatan listrik tetap berfungsi secara optimal, aman, dan andal sesuai dengan standar operasional. Dalam sistem tenaga listrik, khususnya pada peralatan Gardu Induk, pemeliharaan memiliki peran penting dalam mencegah terjadinya gangguan serta memperpanjang umur peralatan. Berdasarkan metode dan waktu pelaksanaannya, pemeliharaan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis sebagai berikut.[5]

- Pemeliharaan *preventif* adalah kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terencana dan berkala dengan tujuan mencegah terjadinya kerusakan atau gangguan pada peralatan. Kegiatan ini meliputi inspeksi visual, pembersihan peralatan, pengencangan sambungan, serta pengujian fungsi peralatan. Dengan dilakukannya pemeliharaan *preventif*, potensi terjadinya gangguan dapat diminimalkan sehingga keandalan sistem tetap terjaga.[10]

- Pemeliharaan *korektif* merupakan tindakan perbaikan yang dilakukan setelah ditemukan adanya anomali atau kerusakan pada peralatan, namun belum menyebabkan kegagalan total. Pemeliharaan ini bertujuan untuk mengembalikan kondisi peralatan ke keadaan normal. Contoh kegiatan pemeliharaan *korektif* antara lain perbaikan komponen yang mengalami penurunan kinerja serta penggantian peralatan yang sudah tidak memenuhi standar operasi.[11]
- Pemeliharaan *Prediktif* merupakan pemeliharaan dengan memprediksi kapan peralatan akan memerlukan pemeliharaan. Ini melibatkan pemantauan kondisi peralatan secara terus-menerus menggunakan sensor, analisis getaran, termografi, dan teknik lainnya untuk mendeteksi tanda-tanda awal kegagalan.[12]
- Pemeliharaan rutin merupakan kegiatan pemeliharaan ringan yang dilakukan secara berkala sebagai bagian dari pemeliharaan *preventif*. Kegiatan ini meliputi pengecekan kondisi fisik peralatan, pencatatan hasil inspeksi, serta pengamatan terhadap kondisi operasi. Pemeliharaan rutin bertujuan untuk memastikan peralatan selalu berada dalam kondisi siap operasi.
- Pemeliharaan darurat adalah pemeliharaan yang dilakukan secara segera akibat terjadinya gangguan yang dapat mengancam kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Pemeliharaan ini bersifat tidak terencana dan membutuhkan respon cepat untuk meminimalkan dampak gangguan terhadap sistem.

2.2 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Multi dkk. (2022) menganalisis *hotspot* pada pemisah (PMS) Gardu Induk 150 kV Rawadenok Depok menggunakan metode *thermovision*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu pada titik sambungan sangat dipengaruhi oleh kualitas sambungan mekanis dan kondisi kontak listrik. Pengukuran suhu dinilai *efektif* sebagai indikator awal untuk mendeteksi potensi gangguan pada peralatan Gardu Induk.[13]

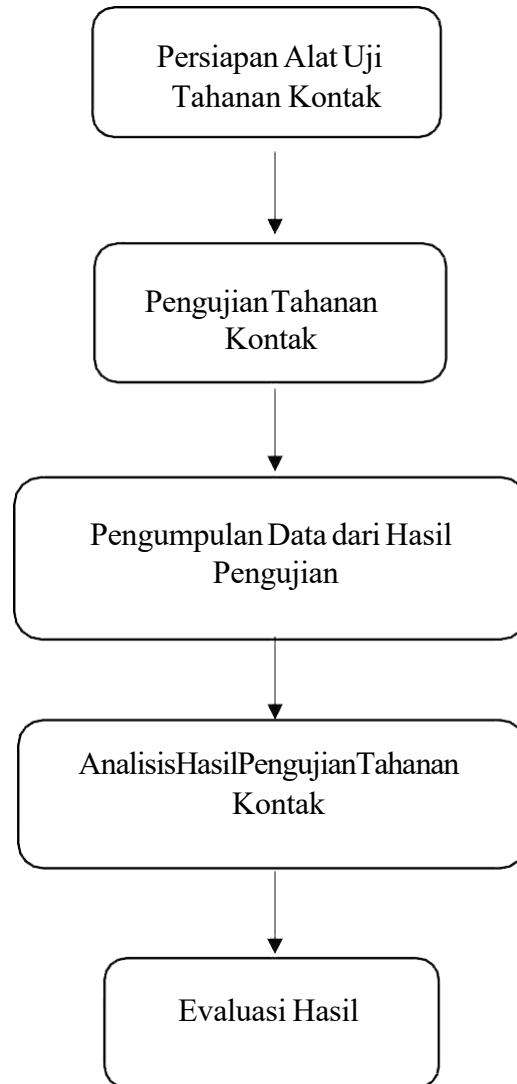
2. Kusmayadi dkk. (2023) melakukan penelitian terkait pengecekan dan penanganan *hotspot* pada pemisah Gardu Induk 150 kV dengan menggunakan kamera inframerah. Penelitian ini menyimpulkan bahwa *hotspot* umumnya disebabkan oleh tahanan kontak yang buruk dan berpotensi menurunkan keandalan peralatan apabila tidak segera dilakukan perbaikan.[13]
3. Cahyani dan Stefanie (2024) melakukan pengujian tahanan kontak pada *disconnecting switch* Gardu Induk 150 kV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tahanan kontak berbanding lurus dengan kenaikan suhu *hotspot* serta besarnya rugi daya listrik yang dihitung menggunakan persamaan rugi Daya ($I^2 R$)[14]
4. Gurning dan Sumpena (2024) membahas perbaikan *hotspot* pada peralatan Gardu Induk baik dalam kondisi bertegangan maupun tidak bertegangan. Hasil penelitian menegaskan bahwa *hotspot* yang dibiarkan dalam jangka waktu tertentu dapat meningkatkan risiko gangguan dan menambah rugi daya listrik pada sistem tenaga.[15]
5. Ezechukwu Kalu Ukiwe dkk. (2024) mengembangkan model *deep learning* untuk mendeteksi *hotspot* dari citra termal pada instalasi listrik yang lebih luas, menunjukkan bahwa teknik pengolahan citra dan pembelajaran mesin dapat meningkatkan akurasi deteksi *hotspot* di berbagai peralatan tenaga listrik.[16]

Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	Analisis <i>Hotspot</i> pada PMS Gardu Induk 150 kV Rawadenok Depok (Multi dkk., 2022)	Terjadinya <i>hotspot</i> pada sambungan PMS akibat kualitas sambungan mekanis dan kontak listrik yang kurang baik	Metode <i>deskriptif</i> melalui pengukuran suhu menggunakan kamera <i>thermovision</i>	Kenaikan suhu <i>hotspot</i> dipengaruhi oleh kondisi sambungan mekanis dan tahanan kontak; <i>thermovision</i> efektif sebagai indikator awal gangguan	Belum dilakukan analisis <i>kuantitatif</i> hubungan suhu <i>hotspot</i> dengan besarnya rugi daya
2	Pengecekan dan Penanganan <i>Hotspot</i> pada Pemisah Gardu Induk 150 kV (Kusmayadi dkk., 2023)	<i>Hotspot</i> pada pemisah Gardu Induk yang berpotensi menurunkan keandalan peralatan	Metode <i>deskriptif</i> melalui inspeksi <i>termografi</i> inframerah dan evaluasi kondisi peralatan	<i>Hotspot</i> disebabkan oleh tahanan kontak yang buruk dan dapat menurunkan keandalan jika tidak segera diperbaiki	Tidak membahas perhitungan Rugi daya akibat <i>hotspot</i> secara <i>matematis</i>
3	Pengujian Tahanan Kontak pada <i>Disconnecting Switch</i> Gardu Induk 150 kV	Peningkatan tahanan kontak pada <i>disconnecting switch</i> yang menyebabkan <i>hotspot</i>	Metode pengujian tahanan kontak dan analisis perhitungan rugi-rugi	Peningkatan tahanan kontak berbanding lurus dengan kenaikan suhu <i>hotspot</i> dan rugi-rugi daya listrik	Belum dianalisis dampak rugi terhadap sistem penyaluran secara

	(Cahyani dan Stefanie, 2024)		tembaga (I ² R)		keseluruhan
4	Perbaikan <i>Hotspot</i> pada Peralatan Gardu Induk (Gurning dan Sumpena, 2024)	<i>Hotspot</i> yang dibiarkan berpotensi meningkatkan risiko gangguan sistem tenaga	Metode <i>evaluatif</i> melalui perbaikan <i>hotspot</i> pada kondisi bertegangan dan tidak bertegangan	Perbaikan <i>hotspot</i> dapat menurunkan risiko gangguan dan mengurangi rugi listrik	Tidak mengkaji hubungan <i>numerik</i> antara nilai <i>hotspot</i> dan rugi daya
5	Deep <i>Learning</i> untuk Deteksi <i>Hotspot</i> pada Instalasi Listrik (Ezechukwu Kalu Ukiwe dkk., 2024)	Keterbatasan akurasi deteksi <i>hotspot</i> menggunakan metode konvensional	Metode pengolahan citra <i>termal</i> berbasis <i>deep learning</i>	Akurasi deteksi <i>hotspot</i> meningkat dibanding metode <i>konvensional</i>	Tidak membahas dampak <i>hotspot</i> terhadap rugi-rugi penyaluran daya listrik

Kerangka Pemikiran



Gambar 2.8 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini dirancang untuk memberikan alur sistematis dalam menganalisis fenomena yang terkait dengan tahanan kontak pada sistem Gardu Induk Rantau. Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah persiapan alat uji tahanan kontak, yang merupakan langkah krusial sebelum pelaksanaan pengujian. Persiapan ini meliputi identifikasi dan pemilihan alat ukur yang sesuai, kalibrasi peralatan untuk memastikan akurasi pengukuran, serta pengecekan kondisi fisik alat agar memenuhi standar keselamatan dan operasional. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan penyiapan dokumen pendukung, prosedur pengujian, dan penetapan titik pengukuran agar pengambilan data dapat dilakukan secara konsisten dan *reliabel*.

Setelah alat uji siap digunakan, langkah berikutnya adalah pengujian tahanan kontak. Tahap ini bertujuan untuk memperoleh data primer mengenai kondisi fisik dan elektrik dari sambungan atau kontak pada Gardu Induk Rantau. Pengujian dilakukan dengan metode yang sesuai standar teknik, yang memungkinkan pengukuran resistansi sambungan secara tepat. Selama proses pengujian, setiap parameter dicatat dengan cermat, termasuk nilai *resistansi*, suhu lingkungan, dan kondisi operasi sistem. Hal ini penting untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dapat mencerminkan kondisi nyata dari sistem yang diuji dan mengurangi potensi bias atau kesalahan pengukuran.

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data dari hasil pengujian, di mana semua informasi yang diperoleh dari pengujian dicatat dan disusun dalam format yang terstruktur. Data yang dikumpulkan mencakup nilai tahanan kontak pada berbagai titik sambungan, serta catatan kondisi operasional selama pengujian berlangsung. Proses pengumpulan data ini juga mencakup validasi awal terhadap data, memastikan bahwa setiap nilai yang dicatat telah sesuai dengan pengukuran aktual dan bebas dari kesalahan teknis. Penyusunan data yang rapi dan sistematis ini menjadi dasar yang kuat untuk analisis lebih lanjut.

Selanjutnya, penelitian memasuki tahap analisis hasil pengujian tahanan kontak. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai yang diperoleh dengan batas toleransi yang ditetapkan, serta mengidentifikasi potensi masalah seperti kenaikan resistansi yang signifikan, adanya *hotspot*, atau indikasi kontak yang longgar. Pada tahap ini, peneliti juga melakukan interpretasi terhadap pola data, korelasi dengan kondisi lingkungan, dan faktor operasional lainnya. Hasil analisis ini akan memberikan gambaran mendetail mengenai

kesehatan sambungan, *efisiensi* penyaluran energi, dan potensi risiko terhadap gangguan sistem tenaga listrik.

Tahap terakhir dalam kerangka pemikiran ini adalah evaluasi hasil. Pada tahap evaluasi, peneliti menilai temuan dari analisis, menyimpulkan kondisi tahanan kontak, serta merumuskan rekomendasi perbaikan atau pemeliharaan. Evaluasi ini mencakup pertimbangan teknis, keselamatan operasional, dan implikasi terhadap keandalan sistem secara keseluruhan. Selain itu, tahap evaluasi juga dapat memberikan dasar bagi penelitian lanjutan, pengembangan prosedur pemeliharaan, dan peningkatan metode pengujian untuk masa mendatang. Dengan demikian, kerangka pemikiran ini membentuk alur penelitian yang sistematis, mulai dari persiapan alat, pengujian, pengumpulan data, analisis, hingga evaluasi hasil, sehingga mendukung tercapainya tujuan penelitian secara *komprehensif*. [17]