

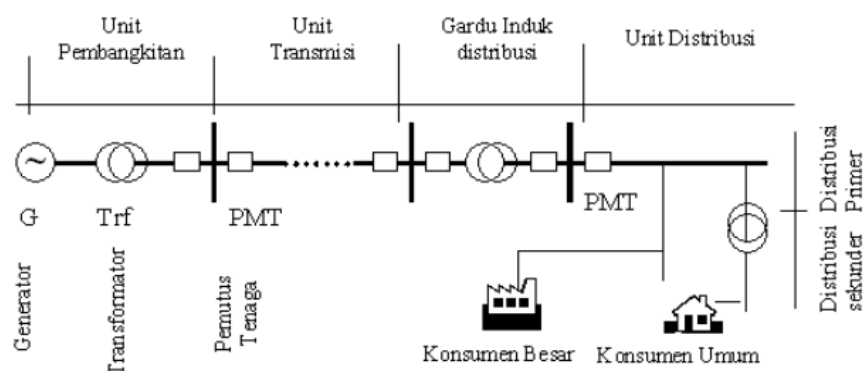
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu rangkaian terintegrasi yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit hingga ke konsumen melalui jaringan distribusi, terutama untuk melayani beban yang berada jauh dari lokasi pembangkit. Secara umum, sistem ini terbagi menjadi tiga subsistem utama. Pertama, sistem pembangkit tenaga listrik yang berperan mengonversi energi primer, baik dari bahan bakar fosil maupun energi terbarukan, menjadi energi listrik dengan komponen utama berupa generator dan gardu induk pembangkit. Kedua, sistem transmisi tenaga listrik yang bertugas mengalirkan listrik dari pembangkit menuju sistem distribusi dengan jarak yang cukup jauh, menggunakan saluran transmisi, gardu induk, serta jaringan sub-transmisi sebagai elemen pentingnya. Ketiga, sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi dari gardu induk ke konsumen akhir sekaligus mengatur pembagian daya listrik sesuai kebutuhan, dengan komponen utama berupa gardu distribusi, jaringan distribusi sekunder, dan beban atau pelanggan sebagai penerima akhir energi listrik.[3]



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada gambar 2.1 tersebut merepresentasikan konfigurasi sistem penyaluran tenaga listrik dari sisi pembangkitan hingga pemanfaatan pada sisi pelanggan. Daya listrik dibangkitkan oleh generator (G) pada unit pembangkitan, kemudian tegangannya dinaikkan melalui transformator daya (Trf) untuk meningkatkan efisiensi penyaluran dengan menekan arus dan rugi-rugi pada saluran. Pada setiap titik strategis dipasang Pemutus Tenaga (PMT) sebagai perangkat switching dan proteksi.

2.1.2 Gardu Induk 150kV

Gardu Induk merupakan suatu fasilitas ketenagalistrikan yang beroperasi pada tingkat Tegangan Ekstra Tinggi (TET), Tegangan Tinggi (TT), maupun Tegangan Menengah (TM), yang tersusun atas bangunan fisik serta berbagai peralatan listrik pendukung. Gardu Induk berperan dalam proses penyaluran dan pengaturan daya listrik dalam satuan kVA atau MVA agar dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem pada level tegangan tertentu. Sumber pasokan daya listrik tersebut dapat berasal langsung dari pembangkit tenaga listrik maupun dari gardu induk lainnya dalam jaringan sistem tenaga.[4]



Gambar 2.2 Gardu Induk 150kV

Pada gambar 2.2 Gardu induk 150 kV merupakan gardu induk tegangan tinggi yang umum digunakan dalam sistem transmisi di Indonesia. Gardu induk ini berfungsi sebagai

simpul sistem tenaga listrik yang melakukan proses switching, proteksi, dan pengukuran pada level tegangan tinggi. Konfigurasi gardu induk dapat berupa single busbar, double busbar, maupun konfigurasi lainnya sesuai kebutuhan sistem.[5]

Pada gardu induk 150 kV, terdapat beberapa peralatan utama, antara lain pemutus tenaga (*circuit breaker*), pemisah (*disconnecting switch*), transformator arus (CT), transformator tegangan (PT/VT), serta peralatan proteksi dan pengukuran. Setiap peralatan harus berada dalam kondisi operasional yang optimal karena bekerja pada lingkungan dengan tegangan tinggi, arus besar, serta kondisi cuaca yang bervariasi.

2.1.3 *Current Transformer (CT)*

Trafo arus (*Current Transformer* – CT) merupakan perangkat yang berfungsi untuk mengukur besaran arus pada instalasi tenaga listrik di sisi primer, baik tegangan ekstra tinggi (TET), tegangan tinggi (TT), maupun tegangan menengah (TM). Alat ini bekerja dengan cara mengubah arus besar pada sistem menjadi arus yang lebih kecil secara presisi dan akurat, sehingga dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan pengukuran maupun proteksi peralatan listrik.[6]



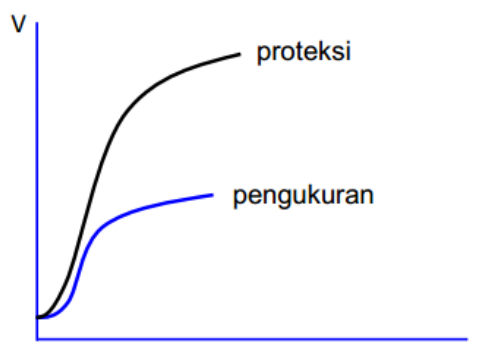
Gambar 2.3 *Current Transformer*
(Dokumentasi Pribadi)

Pada gambar 2.3 tersebut menunjukkan Current Transformer (CT) tegangan tinggi yang terpasang pada konstruksi gardu induk sebagai bagian dari peralatan instrumentasi dan proteksi sistem tenaga.

a. Prinsip Kerja *Current Transformer* (Trafo Arus)

Prinsip kerja dari *Current Transformer* ini adalah untuk mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi, Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Amp dan 5 Amp. [7]

Secara fungsi *Current Transformer* (CT) dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu yang pertama adalah Trafo arus / *Current Transformer* pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan cos phi meter. Lalu yang kedua adalah Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak. Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi dibawah (Gambar 2.3).



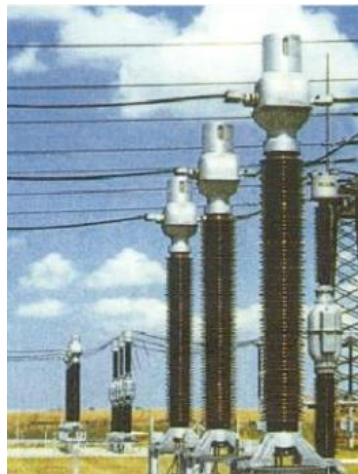
Gambar 2.4 Kurva kejenuhan CT untuk Pengukuran dan Proteksi.[7]

b. Jenis Trafo Arus

Berdasarkan Lokasi pemasangannya, trafo arus dibagi menjadi dua kelompok yaitu :

1) Trafo Arus pemasangan luar ruangan (*Outdoor*).

Trafo arus pemasangan luar ruangan memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, biasanya menggunakan isolasi minyak untuk rangkaian elektrik internal dan bahan keramik/porcelain untuk isolator eksternal. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Trafo Arus Pemasangan Luar Ruangan (*Outdoor*)

2) Trafo Arus pemasangan dalam ruangan (*Indoor*).

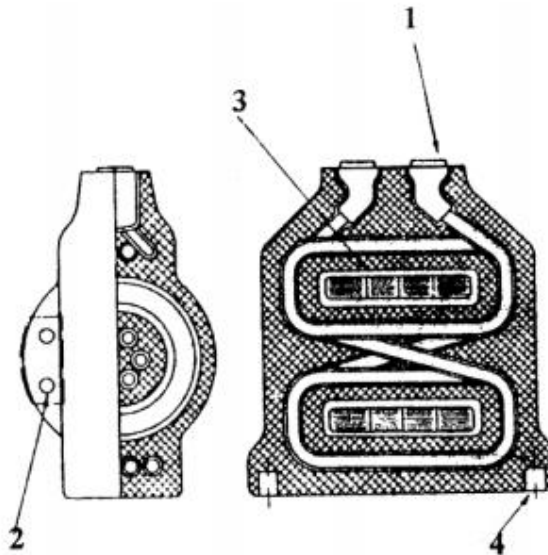
Trafo arus pemasangan dalam ruangan biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Trafo Arus Pemasangan Dalam Ruangan (*Indoor*)

c. Komponen Trafo Arus

Trafo Arus tipe cincin dan cor-coran cast resin (Trafo Arus pemasangan dalam ruangan) biasanya digunakan pada kubikel penyulang (tegangan 20 kV dan pemasangan *indoor*). Jenis Isolasi pada Trafo Arus ini adalah Cast Resin, seperti ditunjukkan pada gambar 2.7 di bawah ini.

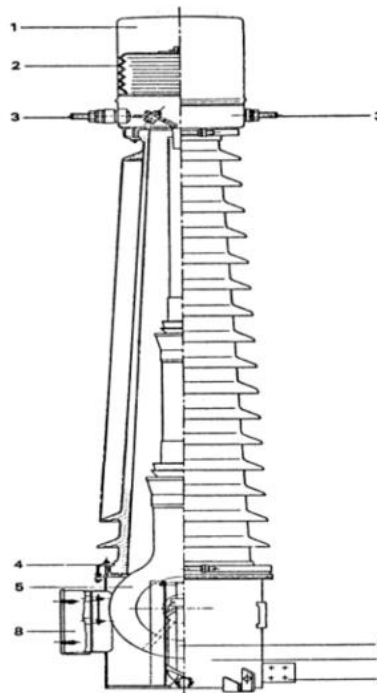


Gambar 2.7 Komponen Trafo Arus Tipe Cincin

Keterangan :

1. Terminal Utama (*primary terminal*)
2. Terminal Sekunder (*secondary terminal*)
3. Kumparan Sekunder (*secondary terminal*)
4. Kumparan Utama (*primary terminal*)

Trafo Arus (*Current Transformer*) tipe tangki mempunyai jenis isolasi minyak. Trafo arus berisolasi minyak ini banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi. Umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV, 150 kV dan 500 kV seperti ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini. [8]



Gambar 2.8 Komponen Trafo Arus Tipe Tangki

Keterangan :

1. Bagian atas Trafo arus (*transformator head*).
2. Peredam perlawanan pemuaian minyak (*oil resistant expansion bellows*).
3. Terminal utama (*primary terminal*).
4. Penjepit (*clamps*).
5. Inti kumparan dengan belitan berisolasi utama (*core and coil assembly with primary winding and main insulation*).
6. Inti dengan kumparan sekunder (*core with secondary windings*).
7. Tangki (*tank*).
8. Tempat terminal (*terminal box*).
9. Plat untuk pentanahan (*earthing plate*).

2.1.4 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB)

a. Prinsip Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan

Prinsip utama pada pekerjaan saluran bertegangan dengan metode barehand sebenarnya cukup sederhana, dapat dianalogikan dengan seekor burung yang hinggap di

atas konduktor bertegangan. Selama tidak ada jalur bagi arus untuk mengalir, burung tetap aman berada di konduktor meskipun tubuhnya berada pada potensial listrik yang sama. Dengan pemahaman ini, pekerja yang telah terlatih serta menggunakan teknik dan peralatan khusus dapat melakukan pekerjaan dengan aman pada tegangan hingga 765 kV menggunakan metode barehand. Hal penting yang harus selalu diperhatikan adalah menjaga jarak aman minimum dari tanah maupun fasa lain yang memiliki beda potensial, guna menghindari kemungkinan aliran arus listrik melalui tubuh pekerja.[9]

Dasar teknis metode kerja bertegangan ini sebenarnya sudah dikenal sejak tahun 1837, ketika Michael Faraday membuktikan bahwa tidak terdapat perbedaan potensial di dalam suatu konduktor. Ia menemukan bahwa tidak terjadi akumulasi muatan listrik, sehingga tidak ada medan elektrostatis di dalam sebuah sangkar logam yang diberi tegangan dengan potensial sama, dengan asumsi tanah sebagai konduktor. Karena tidak ada perbedaan potensial, maka arus tidak akan mengalir. Berdasarkan prinsip ini, seorang pekerja dapat berada dalam kondisi bertegangan jika berada di dalam sangkar Faraday yang terhubung dengan konduktor bertegangan. Dengan demikian, ia dapat bekerja dengan aman pada konduktor tersebut. Namun, hal ini hanya bisa dilakukan apabila pekerja benar-benar terisolasi dari tanah maupun fasa lainnya.

Pada gambar 2.10 memperlihatkan kegiatan pemeliharaan/perbaikan peralatan pada gardu induk yang dilakukan oleh personel teknis pada bagian konduktor/perlengkapan sambungan di area tegangan tinggi, dengan indikasi pekerjaan dilaksanakan tanpa pemadaman untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya.



Gambar 2.10 Pelaksanaan Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan.

b. Metode Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan

Metode *barehand* adalah suatu metode dimana pelaksana bekerja dengan menyentuh konduktor yang bertegangan, sehingga tidak ada perbedaan potensial antara pelaksana dengan konduktor yang bertegangan. Metode ini dapat dilakukan pada tegangan 150 kV sampai dengan 500 kV dengan memperhatikan jarak aman minimum. [10]



Gambar. 2.11 Metode *Barehand* pada Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan

Pada gambar 2.11 memperlihatkan personil PDKB yang sedang melakukan pemeliharaan di atas saluran transmisi SUTET 500kV.

Metode *Hot Stick* adalah suatu metode dimana pelaksana berada di sisi tower yang terisolasi dari konduktor bertegangan. Metode ini menggunakan peralatan hot stick yang terbuat dari Fibreglass Reinforced Plastic (FRP) yaitu fiberglass yang diperkuat dengan plastik dengan jarak tertentu sehingga aman dikerjakan. Semua hot stick yang terbuat dari FRP harus mempunyai daya tahan elektrik dan mekanik yang sesuai standar.

Pada gambar 2.12 dibawah memperlihatkan penggunaan *hot stick* pada pekerjaan penggantian insulator pada saluran transmisi SUTT 150kV dengan konfigurasi tiang penyangga. Dimana seorang personil pemeliharaan PDKB sedang melakukan pelepasan insulator yang mengalami kerusakan untuk diganti dengan yang baru.



Gambar. 2.12 Metode *hotstick* pada Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan

c. Persyaratan Pelaksanaan PDKB

1. Jarak Aman Minimum

Jarak aman minimum terbagi dua yaitu jarak aman minimum personel dan jarak aman minimum peralatan. Jarak aman minimum personel adalah Jarak isolasi udara bebas yang diperlukan untuk mencegah terjadinya busur listrik pada bagian tubuh manusia di tempat kerja ketika terjadi tegangan lebih transien maksimum yang diantisipasi. Jarak pendekatan minimum adalah penjumlahan dari jarak elektrik yang disesuaikan dengan tegangan maksimum sistem dan jarak ergonomis yang dipilih. Untuk selanjutnya jarak aman minimum personel disebut *Live Line Minimum Approach Distance* (LLMAD) Selanjutnya Jarak Aman Minimum Peralatan adalah Jarak isolasi udara bebas yang diperlukan untuk mencegah terjadinya busur listrik pada peralatan insulasi di tempat kerja ketika terjadi tegangan lebih transien maksimum yang diantisipasi. Jarak ini digunakan sebagai penentuan panjang isolasi minimum pada peralatan insulasi PDKB. Untuk Selanjutnya jarak aman minimum peralatan disebut *Minimum Tools Insulation Distance* (MTID)

Nilai Jarak aman minimum personel dan jarak aman minimum peralatan mengacu pada SPLN T3.010-2020 Peralatan PDKB pada TT-TET yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Jarak Aman Minimum PDKB untuk setiap tegangan sistem

No	Tegangan Sistem (tegangan max)	LLMAD Fasa – Tanah (m)	LLMAD Fasa – Fasa (m)	MTID (m)
1	66 kV (72,5kV)	0,9	1,2	0,9
2	150 kV (170 kV)	1,2	1,9	1
3	275 kV (300 kV)	2	3,4	1,9
4	500kV (550 kV)	3,4	6	3,3

2. Pemeriksaan Kesehatan Personel

Setiap personel yang akan melaksanakan pekerjaan dalam keadaan bertegangan harus dipastikan kondisi kesehatannya dalam keadaan baik dan sehat. Pemeriksaan Kesehatan yang dilakukan meliputi suhu tubuh, tekanan darah, denyut nadi, penglihatan dan pendengaran.

Pengukuran tekanan darah, denyut nadi dan suhu badan dilaksanakan di kantor sebelum berangkat ke lokasi pekerjaan atau sebelum memulai aktifitas.

Nilai batasan pada pemeriksaan kesehatan personel :

- 1) Tekanan darah <120/80 mmHg dan toleransi maksimal 139/89 mmHg. Jika nilai pengukuran tidak memenuhi Batasan maka diperlukan rekomendasi dari dokter.
- 2) Denyut nadi 60 – 90 kali/menit.
- 3) Suhu badan 36 °C – 37,5 °C

Hasil pemeriksaan kesehatan tersebut dituangkan dalam bentuk formulir pemeriksaan kesehatan dengan ditanda tangani oleh personel yang bersangkutan dan pengawas pada pekerjaan PDKB.

2.1.5 Serandang Gardu Induk

Serandang merupakan bagian vital pada sistem transmisi PLN yang berfungsi sebagai penghubung atau terminal antar perangkat di dalam Gardu Induk konvensional. Baik untuk level tegangan tinggi maupun ekstra tinggi, komponen ini memastikan aliran tenaga listrik tersalurkan dengan baik. Mengingat fungsinya sebagai wadah penempatan alat, ukuran serandang sangat bergantung pada kuantitas peralatan di lapangan. Oleh

karena itu, penambahan unit peralatan dalam sebuah Gardu Induk secara otomatis akan memperluas area serandang yang dibutuhkan.[11]

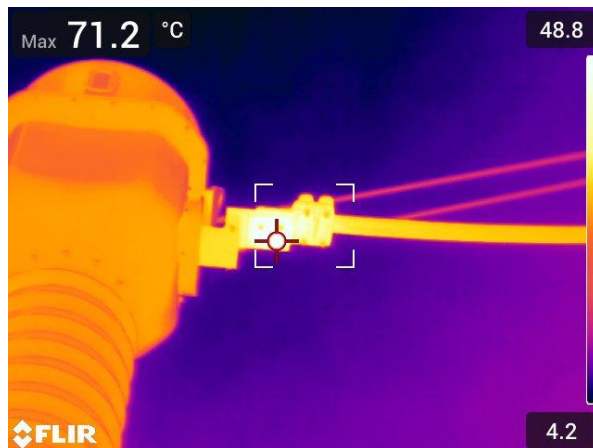


Gambar 2.13 Serandang Gardu Induk Konvensional

Pada gambar 2.13 diatas memperlihatkan gambaran dari serandang gardu induk konvensional yang terdiri dari beberapa bay penghantar termasuk di dalamnya ada Trafo tenaga.

2.1.6 Hotspot

Hotspot merupakan fenomena kenaikan suhu tidak wajar pada titik tertentu dalam sistem kelistrikan yang mengindikasikan adanya anomali [12]. Kondisi ini umumnya dipicu oleh faktor mekanis dan lingkungan, seperti proses oksidasi pada sambungan, akumulasi kotoran, atau adanya arus bocor. Dalam lingkup jaringan transmisi, khususnya pada SUTT dan SUTET, titik panas ini sering kali muncul pada area klem peralatan serta sambungan konduktor, terutama pada bagian *dead end compression*. Peningkatan suhu tersebut secara teknis disebabkan oleh naiknya nilai hambatan kontak akibat paparan polutan pada area sambungan, yang jika dibiarkan dapat memicu gangguan pada kontinuitas penyaluran energi listrik.



Gambar 2.14 Anomali Hotspot pada *Current Transformer*

Pada gambar 2.14 mempresentasikan bagaimana hasil penemuan anomali hotspot pada sambungan klem *current transformer* (CT) dengan menggunakan kamera thermal.

Keberadaan hotspot menurunkan efisiensi dan berpotensi merusak peralatan. Deteksi hotspot dilakukan dengan metode termovisi pada beban puncak untuk mengukur selisih temperature (ΔT) antara komponen. hotspot diketahui dengan melihat ΔT dari objek yang kita inspeksi berdasarkan persamaan (2.1) di bawah ini :

$$\Delta T = (I_{\max} / I_{\text{beban}})^2 \times \Delta T_{\text{awal}} \quad (2.1)$$

Dimana :

$I_{\max}$: Arus tertinggi yang pernah dicapai

I_{beban} : Arus saat pengukuran

ΔT_{awal} : Selisih suhu konduktor dan Klem CT

Untuk mengetahui tingkat keparahan dan rekomendasi tindak lanjut perbaikan dari hasil perhitungan nilai selisih suhu (ΔT) dapat dilihat dari tabel 4.1 dibawah ini [19] :

Tabel 2.2 Evaluasi dan Rekomendasi Thermovisi Klem

No	ΔT Akhir	Rekomendasi
----	------------------	-------------

1	< 10°C	Kondisi normal, pengukuran berikutnya dilakukan sesuai jadwal
2	10°C - 25°C	Perlu dilakukan pengukuran dua minggu lagi
3	25°C - 40°C	Perlu dilakukan pengukuran satu minggu lagi dan direncanakan perbaikan dalam periode maksimal dua minggu lagi
4	40°C - 70°C	Perlu dilakukan pengukuran periode harian dan perbaikan segera dalam periode maksimal tiga hari
5	>70°C	Kondisi Darurat

a. Faktor Penyebab Terjadinya Hotspot

Terdapat lima faktor utama yang berpotensi menyebabkan terjadinya hotspot pada klem *current transformer*, di mana ketiga faktor tersebut dapat muncul secara bersamaan. Adapun faktor-faktor yang dimaksud akan dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.

1. Penyambungan

Menyambungkan konduktor dengan klem dalam hal ini klem pada *Current Transformer* harus memiliki kekencangan yang sesuai tidak boleh terlalu kendur maupun terlalu kencang. Selain kekuatan sambungan cela udara juga menjadi faktor kualitas komponen ini.

2. Kualitas Bahan

Pemilihan material serta mutu dari klem yang digunakan memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat keandalan penyaluran tenaga listrik. Kualitas bahan yang digunakan pada konduktor maupun klem berperan penting dalam menjamin kelancaran proses penyaluran daya. Penggunaan konduktor dan klem dengan kualitas yang tidak memadai berpotensi memicu terjadinya hotspot yang dapat berkembang menjadi gangguan pada sistem. Oleh karena itu, pemilihan jenis dan merek material yang digunakan harus memenuhi standar teknis yang telah ditetapkan.

3. Beban Arus Listrik

Tingginya tingkat pembebanan dapat menjadi salah satu penyebab munculnya hotspot pada konduktor maupun titik sambungan. Kondisi ini umumnya terjadi ketika terdapat penambahan beban yang relatif besar dan berlangsung secara kontinu dalam jangka waktu tertentu.

4. Korosi dan Oksidasi

Sambungan maupun klem yang terpapar kondisi lingkungan, seperti pengaruh cuaca maupun zat kimia tertentu, berpotensi mengalami proses korosi atau oksidasi. Kedua fenomena tersebut dapat meningkatkan nilai resistansi serta menurunkan efisiensi penghantaran listrik, yang pada akhirnya memicu kenaikan temperatur dan terbentuknya hotspot.[13]

5. Hambatan

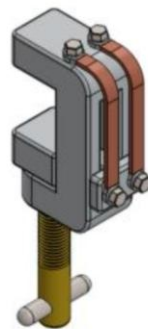
Hambatan memiliki karakteristik dalam menahan aliran arus listrik serta mengonversi energi listrik menjadi energi panas. Seiring dengan meningkatnya arus beban, jumlah panas yang dihasilkan juga akan semakin besar. Panas yang timbul akibat adanya hambatan tersebut dapat menyebabkan terjadinya pemuaiian pada sambungan maupun klem. Apabila pada proses pemasangan klem jumper konduktor terdapat celah udara, maka kotoran dapat masuk ke dalam sambungan sehingga menambah nilai hambatan.[14]

2.1.7 *Sandwich Clamp*

Sandwich Clamp merupakan suatu alat utama yang menjadi solusi perbaikan anomali hotspot di klem sambungan pada peralatan gardu induk, dimana pada implementasinya memberikan konsep baru dalam perbaikan anomali hotspot dengan kondisi tanpa padam dan tanpa memerlukan jumper konduktor sementara sehingga memungkinkan untuk dapat dilakukan dengan *clearance* yang saat ini sulit untuk dilakukan secara *online* atau tanpa padam pada *Clamp Current Transformer* (CT), *Clamp* PMT pole bawah dan lainnya yaitu dengan cara mengapit clamp yang mengalami hotspot pada bagian permukaan atas dan bawahnya dengan *Sandwich* bertujuan membagi arus beban sehingga menurunkan suhu pada clamp yang mengalami hotspot tersebut.[15]

Pengimplementasian Sandwich memiliki keunggulan strategis dalam mendorong keandalan sistem transmisi, antara lain:

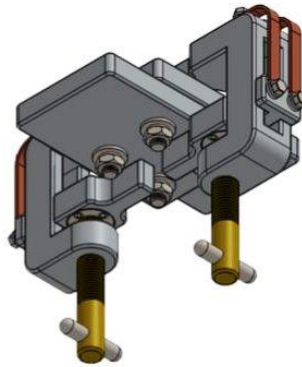
1. Tanpa padam dimana perbaikan permanen dapat dilakukan tanpa memutus suplai listrik.
2. Menanggulangi anomali *Hotspot* dan mengurangi *Losses* Energi dengan distribusi arus yang merata sehingga hambatan listrik dan pemanasan berlebih dapat ditekan untuk mengurangi rugi-rugi energi.
3. Tanpa jumper kondoktor menjadikan metode ini praktis dan aman diterapkan.
4. Menjaga kontinuitas pelayanan, dengan terjaminnya ketersediaan (*Availability*) transmisi dan *transformator*.
5. Mengurangi potensi *Energy Not Served* (ENS),
6. Efisiensi pelaksanaan pekerjaan karena dapat meminimalkan jumlah personel, waktu kerja, dan peralatan yang dibutuhkan selama proses perbaikan.



Gambar 2.15 Desain *Sandwich Clamp*.

Pada gambar 2.15 diatas memperlihatkan gambar desain dari *sandwich clamp* yang didesain sebagai alat dalam pekerjaan perbaikan hotspot di klem *current transformer* (CT).

Cara kerja *Sandwich Clamp* ini adalah dengan cara menjepit bagian *clamp current transformer* (CT) yang mengalami hotspot, sehingga arus beban pada *clamp* tersebut terbagi. Perbaikan anomali hotspotnya dilakukan dengan tanpa membuka atau melepas terminal atau *clamp* eksisting yang mengalami hotspot.



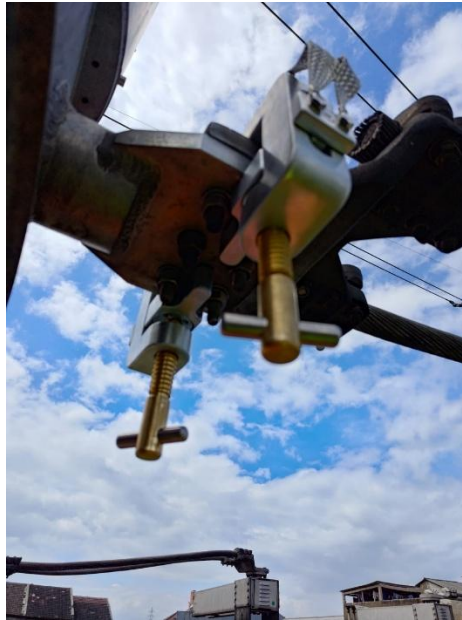
Gambar 2.16 Contoh Pemasangan *Sandwich Clamp*.

Pada gambar 2.16 diatas merupakan contoh ilustrasi dari desain *sandwich clamp* yang sudah terpasang pada klem *current transformer* (CT).



Gambar 2.17 Proses Pemasangan *Sandwich Clamp*

Pada gambar 2.17 diatas ini memperlihatkan proses pemasangan *sandwich clamp* di lapangan ke titik anomali hotspot pada klem *current transformer* (CT).



Gambar 2.18 *Sandwich Clamp* terpasang pada *Clamp* eksisting

Pada gambar 2.18 diatas ini memperlihatkan gambaran pemasangan *sandwich clamp* di lapangan yang sudah terpasang di klem *current transformer* (CT).

2.1.8 *Thermovision*

Thermovisi adalah metode inspeksi secara *online*, yaitu pemeriksaan yang dilakukan ketika peralatan masih beroperasi. Proses ini memanfaatkan thermal imager yang mendeteksi radiasi inframerah dari suatu objek, kemudian mengubahnya menjadi data temperatur. Nilai suhu yang terukur selanjutnya ditampilkan pada layar atau terekam pada kamera thermal dalam bentuk informasi suhu permukaan benda atau perangkat yang diperiksa.[16]

Kamera termal (*thermal imager*) FLIR yang digunakan sebagai instrumen inspeksi termovisi dalam kegiatan pemeliharaan berbasis kondisi pada instalasi ketenagalistrikan. Peralatan ini bekerja dengan mendeteksi radiasi inframerah yang dipancarkan permukaan objek, kemudian mengonversinya menjadi citra termal dan nilai temperatur sehingga memungkinkan identifikasi anomali termal seperti hotspot pada koneksi, klem, busbar, maupun komponen peralatan listrik lainnya tanpa kontak langsung. Selain menampilkan distribusi suhu secara visual, kamera termal umumnya menyediakan fitur pengaturan parameter pengukuran (misalnya emisivitas dan jarak), perekaman foto/hasil inspeksi,

serta dokumentasi data yang dapat digunakan untuk analisis tren, penentuan tingkat keparahan anomali, dan penyusunan rekomendasi tindakan korektif guna meningkatkan keandalan operasi peralatan seperti pada gambar 2.19 di bawah ini.



Gambar 2.19 Kamera *Thermovision* merk Flir Type E75

Jika hasil pengukuran *thermovision* menggunakan *thermal imager* menunjukkan kondisi yang tidak normal—misalnya temperatur peralatan terdeteksi terlalu tinggi—maka penanganan yang dapat dilakukan antara lain melakukan penguatan/pengencangan pada klem dan konduktor, melaksanakan perbaikan pada peralatan listrik terkait, hingga penggantian peralatan apabila diperlukan.[17]

Dari hasil pengukuran *thermovision* diperlukan data tambahan untuk dilakukan evaluasi yaitu data beban saat pengukuran dan beban tertinggi yang pernah dicapai (dalam ampere). [18]

2.2. Penelitian yang Relevan

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

1. Menurut Muhammad Nur Azikin Akib dan Eko Ihsanto. 2023, dalam jurnal yang berjudul “Analisis Perbaikan *Hotspot* Pada SUTT 150kV NewRancakasumba – Ujungberung T.13 Penghantar I Fasa S Metode PDKB” menyatakan bahwa Pelaksanaan perbaikan pada klem jumper dengan metode PDKB diawali dengan penyusunan Job Safety Analysis (JSA) untuk memperoleh data lapangan yang kemudian dijadikan dasar dalam pembuatan Analisis Keselamatan Pekerjaan (AKP). Setelah dokumen AKP disusun, tim melakukan tahap persiapan peralatan dan personel menuju lokasi tower untuk melaksanakan pekerjaan. Proses perbaikan dilakukan dengan membersihkan klem jumper yang mengalami kotoran atau oksidasi menggunakan metode PDKB. Setelah seluruh tahapan selesai, tim melaksanakan evaluasi hasil kerja serta menyusun Berita Acara Pekerjaan (BAP) sebagai laporan penyelesaian. Berdasarkan hasil pengukuran, energi listrik yang hilang akibat titik *hotspot* mencapai 17,289 watt per detik dengan nilai kerugian sekitar Rp 1.411,94. Selama proses perbaikan menggunakan metode PDKB, sistem tetap menyalurkan daya sebesar 79,69 MW, sehingga biaya yang berhasil dihemat mencapai Rp 361.792.600. Adapun dampak serius dari gangguan *hotspot* terhadap sistem kelistrikan adalah potensi terjadinya kerusakan fatal, seperti terputusnya aliran daya antar Gardu Induk (GI) sebelum penormalan dilakukan, serta kerugian material akibat melelehnya komponen karena suhu berlebih.
2. Menurut Renato Alfauzi dan Dini Fauziah. 2023, dalam jurnal yang berjudul “Perbaikan Koneksi Klem Transformator Arus untuk menurunkan *Hotspot* di Gardu Induk 150kV Kebasen Bay Brebes I” menyatakan bahwa sebelum dilakukan perbaikan, trafo arus pada fasa S yang terdeteksi mengalami *hotspot* menunjukkan selisih suhu sebesar 35 °C, sedangkan pada fasa R dan T hanya terdapat perbedaan 2 °C, sehingga selisih suhu sebesar 33 °C ini mengindikasikan kondisi yang tidak normal dan berada di luar standar yang ditetapkan oleh PLN. Setelah dilakukan perbaikan oleh tim HAR ULTG, hasil pengukuran menunjukkan bahwa selisih suhu pada fasa S menurun menjadi 3 °C, fasa R sebesar 1 °C, dan fasa T mencapai 0 °C, dengan total selisih hanya 2 °C, yang menandakan kondisi peralatan sudah kembali normal. Untuk mendeteksi adanya indikasi *hotspot* pada peralatan, dilakukan inspeksi level 1 dan level 2 menggunakan alat thermogun FLIR secara berkala,

minimal satu kali setiap bulan untuk peralatan dengan tegangan ≤ 150 kV, dan minimal dua kali dalam sebulan untuk peralatan dengan tegangan ≥ 150 kV. Namun, pada kondisi tertentu, frekuensi inspeksi dapat disesuaikan dengan kebutuhan lapangan, serta pengukuran dilakukan baik pada beban puncak siang maupun malam hari guna mendapatkan hasil yang lebih akurat.

3. Menurut Samuel Frando Gurning dan Sumpena. 2024, dalam jurnal yang berjudul “Analisa Perbaikan *Hotspot* Dalam Keadaan Bertegangan dan Tidak Bertegangan di PT.PLN (Persero) UPT Cawang” menyatakan bahwa penelitian ini berfokus pada analisis perbaikan *hotspot* pada sistem kelistrikan di UPT Cawang dengan membandingkan dua pendekatan, yaitu metode PDKB (Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan) dan metode offline (tidak bertegangan), berdasarkan hasil pengukuran thermovisi. Keberadaan *hotspot* pada area sambungan antara klem dan konduktor dapat menimbulkan kerusakan serius apabila tidak segera ditangani, karena dapat menurunkan tingkat keandalan sistem serta meningkatkan risiko terjadinya gangguan atau pemadaman listrik. Metode offline memiliki kelemahan berupa potensi rugi daya dan gangguan suplai, sedangkan metode PDKB memungkinkan proses perbaikan dilakukan tanpa menghentikan aliran listrik, meskipun memerlukan keterampilan teknis serta peralatan khusus. Analisis dilakukan dengan menggunakan parameter ΔT suhu untuk menilai tingkat keparahan *hotspot*, menghitung gain saving dari penerapan metode PDKB, serta menganalisis rugi-rugi daya pada metode offline. Berdasarkan hasil thermovisi di GI Cibubur dan GI Jatirangon, ditemukan perbedaan suhu yang cukup signifikan antar fasa sehingga diperlukan tindakan perbaikan sesuai standar PLN. Setelah perbaikan dilakukan, metode PDKB di GI Cibubur berhasil menurunkan suhu dari 59°C menjadi $35,7^{\circ}\text{C}$, sementara metode offline di GI Jatirangon menurunkan suhu dari 62°C menjadi $39,9^{\circ}\text{C}$ pada fasa R dan dari 57°C menjadi $40,2^{\circ}\text{C}$ pada fasa S. Hasil analisis gain saving menunjukkan bahwa penerapan metode PDKB mampu menghemat energi sebesar 694.440 kWh, sedangkan metode offline menimbulkan kerugian energi hingga 285.260 kWh, sehingga dapat disimpulkan bahwa PDKB memberikan keuntungan teknis dan ekonomis yang lebih signifikan dibandingkan metode offline.

4. Menurut Layin Wahyu Djunaedi, Bambang Minto Basuki dan M.Jasa Afroni. 2024, dalam jurnal yang berjudul “Analisis Pengaruh *Hotspot* Terhadap Rugi Daya Pada Pemisah Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500kV Krian” menyatakan bahwa meskipun kerugian yang ditimbulkan oleh adanya anomali *hotspot* tidak tampak terlalu besar, kondisi tersebut berpotensi memengaruhi daya total yang mengalir dalam sistem dan dapat menyebabkan kehilangan energi hingga 1.300.200 kW per jam apabila terjadi gangguan padam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur nilai tahanan kontak pada peralatan pemisah (disconnecting switch) dengan menggunakan alat uji megger. Pengujian dilakukan melalui metode shutdown measurement, yaitu dengan mengalirkan arus dan tegangan pada pisau pemisah guna memperoleh nilai tahanan kontak yang terukur secara akurat dari hasil pembacaan alat uji tersebut.
5. Menurut Kurniawan Muhammad Aziz. 2024, dalam jurnal yang berjudul “Analisa Perhitungan Energi Terselamatkan Pada Pekerjaan Penggantian Insulator Pasca Gangguan Di SUTT 150kV Sistem Interkoneksi Kalimantan” menyatakan bahwa secara umum, pemeliharaan saluran transmisi biasanya dilakukan dalam kondisi offline, namun metode ini menimbulkan energi tidak tersalurkan (Energy Not Served/ENS) yang berdampak pada kerugian finansial, sehingga pelaksanaannya menjadi kurang efisien dan sulit diterapkan secara rutin. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan penerapan metode PDKB (Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan) yang bersifat berkelanjutan dan kontinu, di mana kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan tanpa perlu memutus aliran listrik. Dengan demikian, suplai listrik dapat tetap stabil dan berkesinambungan selama proses berlangsung. Pendekatan ini juga berpotensi menghemat energi yang biasanya hilang pada pemeliharaan offline, sehingga berdampak langsung pada efisiensi biaya dan peningkatan pendapatan perusahaan. Penelitian ini membandingkan energi yang berhasil diselamatkan melalui penggantian insulator SUTT 150 kV pascagangguan di Sistem Interkoneksi Kalimantan, dengan mempertimbangkan parameter seperti tegangan, arus, durasi pekerjaan, serta harga berdasarkan Transmission Service Agreement (TSA). Analisis dilakukan terhadap pekerjaan online (PDKB) dan offline untuk menilai pengaruhnya terhadap

kehilangan ENS, energi yang hilang, serta dampaknya terhadap pendapatan perusahaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PDKB menghasilkan ENS sebesar 0 MWh, sedangkan metode offline mencapai ENS sebesar 5.352,36 MWh. Dengan penerapan PDKB, energi sebesar 4.635 MWh berhasil diselamatkan atau setara dengan Rp 163.087.110, sedangkan metode offline menimbulkan kerugian hingga Rp 322.479.690, menegaskan bahwa PDKB jauh lebih efisien dan ekonomis dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik.

Tabel 2.2 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Analisis Perbaikan <i>Hotspot</i> Pada SUTT 150kV NewRancak asumba – Ujungberung T.13 Penghantar I Fasa S Metode PDKB” (Muhammad Nur Azikin Akib dan Eko Ihsanto. 2023)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah melakukan perbaikan <i>hotspot</i> yang terjadi pada klem <i>jumper</i> dengan metode Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB).	Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif. Melakukan perhitungan Rugi daya karena <i>hotspot</i> dan daya yang terselamatkan karena metode pekerjaan yang dilakukan .	Suhu <i>hotspot</i> sebelum perbaikan: 79,2°C (string dalam) & 90°C (string luar). Setelah perbaikan, suhu turun menjadi $\pm 33^{\circ}\text{C}$. Resistansi menurun signifikan ($802\ \mu\Omega \rightarrow 21\ \mu\Omega$). Energi listrik yang hilang akibat <i>hotspot</i> : 17,289 watt/detik ($\approx$ Rp 1,38	Penelitian hanya fokus pada satu titik <i>hotspot</i> (Tower T.13 fasa S). Belum ada perbandingan dengan metode lain (double jumper, penggantian <i>clamp</i>). Belum membahas pemodelan prediktif <i>hotspot</i> jangka panjang.

				juta). Dengan PDKB, energi tetap tersalurkan 79,69 MW dan biaya terselamatkan Rp354.142.360.	Faktor lingkungan (cuaca, kelembaban, polutan) hanya dijelaskan umum, belum dianalisis kuantitatif.
2.	“Perbaikan Koneksi Klem Transformator Arus untuk Menurunkan <i>Hotspot</i> di Gardu Induk 150 kV Kebasen Bay Brebes I” (Renato Alfauzi dan Dini Fauziah. 2023)	Terjadi <i>hotspot</i> pada klem transformator arus (CT) khususnya fasa S. Selisih suhu mencapai 35°C, jauh melebihi standar PLN (<10°C). Kondisi ini berpotensi merusak CT dan menurunkan umur pakai peralatan.	Inspeksi level 1 dan 2 dengan kamera infrared (thermovisi). Pengambilan data suhu per bulan pada beban puncak malam hari (34 data). Analisis selisih suhu antara klem CT dan konduktor. Perbaikan dengan pembersihan sambungan klem CT dan konduktor.	Sebelum perbaikan: selisih suhu fasa S sebesar 35°C (kondisi buruk). Setelah perbaikan: selisih suhu turun menjadi 3°C (kondisi baik, sesuai standar PLN). Suhu fasa R: 31,3°C → 26,9°C ($\Delta T = 2^\circ\text{C} \rightarrow 1^\circ\text{C}$). Suhu fasa T: 31,3°C → 26,3°C ($\Delta T = 2^\circ\text{C} \rightarrow 0^\circ\text{C}$).	Fokus pada satu kasus <i>hotspot</i> di Gardu Induk Kebasen, belum dibandingkan dengan lokasi lain. Hanya menganalisis perbaikan dengan pembersihan sambungan, belum dieksplorasi metode lain (penggantian <i>clamp</i> ,

			kinerja transformator.	Kondisi CT setelah perbaikan memenuhi standar PLN No.0520-2.K/DIR.2014.	penggunaan material baru). Analisis hanya berbasis thermovisi, belum menggunakan pemodelan prediktif atau data tren jangka panjang. Faktor lingkungan (korosi, polusi, kelembaban) disebutkan, namun tidak diteliti secara detail.
3.	Analisa Perbaikan <i>Hotspot</i> Dalam Keadaan Bertegangan dan Tidak Bertegangan di PT PLN	<i>Hotspot</i> pada sambungan klem dan konduktor menurunkan keandalan sistem transmisi. Metode perbaikan offline	Inspeksi <i>hotspot</i> dengan thermovisi. Analisis ΔT suhu pada fasa R, S, T. Perbaikan dilakukan dengan dua metode:	GI Cibubur (Offline): Fasa R: 59°C → 35,7°C ($\Delta T = 36,34^\circ\text{C}$). Fasa S: 34°C ($\Delta T = 3,8^\circ\text{C}$, normal).	Penelitian hanya membandingkan dua metode (PDKB vs Offline), belum melibatkan metode alternatif lain

	(Persero) UPT Cawang. (Samuel, 2024)	menyebabkan rugi daya dan gangguan suplai. Perlu analisis perbandingan antara metode PDKB (tanpa padam) dan offline (padam).	Offline (pemadaman tegangan, GI Cibubur). PDKB (tanpa pemadaman, GI Jatirangon). Perhitungan rugi daya dan gain saving dari masing-masing metode.	Fasa T: 33°C ($\Delta T = 2,5^{\circ}\text{C}$, normal). Kerugian daya: 285.260 kWh. GI Jatirangon (PDKB): Fasa R: 62°C → 39,9°C ($\Delta T = 33,78^{\circ}\text{C}$). Fasa S: 57°C → 40,2°C ($\Delta T = 26,44^{\circ}\text{C}$). Fasa T: 45°C → 40,4°C ($\Delta T = 8,76^{\circ}\text{C}$). Energi tetap tersalurkan: 694.440 kWh (gain saving).	(misal <i>clamp</i> baru atau jumper tambahan). Analisis masih terbatas pada dua lokasi GI, sehingga generalisasi terbatas. Dampak faktor eksternal (kelembaban, polusi, kondisi lingkungan) hanya dijelaskan secara umum, belum dianalisis kuantitatif. Belum ada model prediksi jangka panjang terkait risiko <i>hotspot</i> pasca perbaikan.
4.	“Analisis Pengaruh <i>Hotspot</i>	Ditemukan <i>hotspot</i> pada pisau pemisah	Studi Literatur terkait pemeliharaan	Sebelum perbaikan:	Penelitian hanya berfokus pada satu

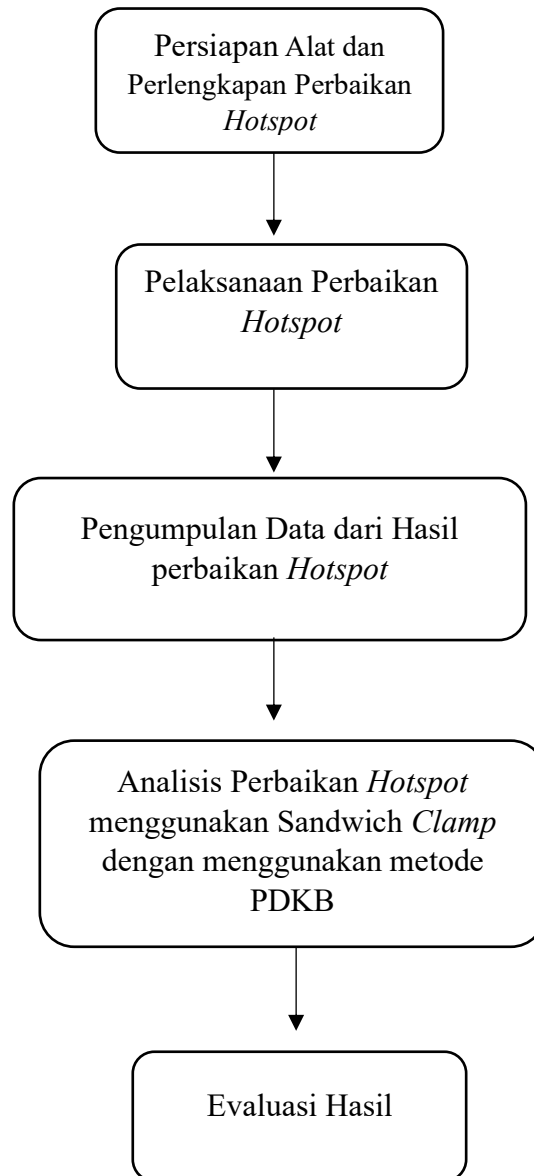
	Terhadap Rugi Daya Pada Pemisah Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500kV Krian” (Layin Wahyu. 2024)	Bay Krian– Grati 2 di GITET 500/150 kV Krian (Februari 2024). Nilai tahanan kontak melebihi standar PLN (50 $\mu\Omega$). <i>Hotspot</i> berpotensi menimbulkan kerugian teknis, rugi daya, bahkan padamnya sistem.	GI dan fenomena <i>hotspot</i>. Pengukuran langsung di lapangan (shutdown measurement): Thermovisi menggunakan kamera infra merah (Flir). Pengukuran tahanan kontak dengan Megger Mjolner 200. Perhitungan rugi daya & kerugian biaya menggunakan persamaan standar PLN.	Suhu fasa R: 78°C, S: 180°C, T: 170°C $\rightarrow \Delta T = 102^\circ\text{C}$ (tidak memenuhi standar). Nilai tahanan kontak: R = 358,8 $\mu\Omega$; S = 2003 $\mu\Omega$; T = 2657 $\mu\Omega$ (semua melebihi 50 $\mu\Omega$). Rugi daya = 2,74 kW $\rightarrow$ energi hilang 9864 kWh/jam $\rightarrow$ kerugian biaya Rp 11.195.640/jam. Setelah perbaikan (penggantian pisau pemisah): Suhu turun ke kisaran 28–33°C ($\Delta T = 5,5^\circ\text{C}$, memenuhi standar). Nilai tahanan kontak: R =	kasus di GI Krian, belum dibandingkan dengan lokasi lain. Metode yang dikaji hanya shutdown measurement, belum membahas metode PDKB (tanpa padam). Faktor penyebab <i>hotspot</i> (korosi, kotoran, baut longgar, kelonggaran kontak) disebutkan, tapi belum dianalisis secara kuantitatif. Belum ada analisis prediksi jangka panjang terkait risiko <i>hotspot</i>
--	--	---	---	--	---

				15,50 $\mu\Omega$; S = 16,83 $\mu\Omega$; T = 15,46 $\mu\Omega$ (memenuhi standar). Rugi daya = 0,0261 kW $\rightarrow$ energi hilang 93,96 kWh/jam $\rightarrow$ kerugian biaya Rp 106.644/jam. Perbandingan kerugian sebelum dan sesudah perbaikan: 1 : 105. Jika <i>hotspot</i> dibiarkan, potensi kehilangan daya akibat padam bisa mencapai 1.300.200 kWh/jam.	pasca perbaikan.
5.	Analisa Perhitungan Energi Terselamatk	Ditemukan <i>hotspot</i> pada konektor konduktor di	Observasi lapangan di GI Karanganyar.	Sebelum perbaikan: Suhu tertinggi mencapai	Penelitian hanya dilakukan di satu GI

an Pada Pekerjaan Penggantian Insulator Pasca Gangguan Di SUTT 150kV Sistem Interkoneksi Kalimantan. (Kurniawan Muhamad, 2024)	Gardu Induk 150 kV Karanganyar. Nilai suhu melebihi standar ($\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$). Tahanan kontak yang tinggi berpotensi menimbulkan rugi daya, kerugian biaya, dan menurunkan keandalan sistem.	Pengukuran thermovisi untuk mendeteksi <i>hotspot</i> . Pengukuran tahanan kontak dengan micro- ohm meter. Perhitungan rugi daya & biaya berdasarkan standar PLN dan tarif dasar listrik (TDL).	$\pm 85^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 40^{\circ}\text{C} \rightarrow$ tidak memenuhi standar PLN ($< 10^{\circ}\text{C}$). Tahanan kontak konektor: rata- rata 400–600 $\mu\Omega$ (melebihi batas 50 $\mu\Omega$). Rugi daya mencapai $\pm 1,5$ kW $\rightarrow$ energi hilang sekitar 5400 kWh/jam $\rightarrow$ kerugian biaya Rp 6.129.000 per jam. Setelah perbaikan (pembersihan & pengencangan konektor): Suhu turun ke kisaran $\pm 35^{\circ}\text{C}$, $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$ (memenuhi standar). Nilai tahanan kontak turun ke	(Karanganyar), sehingga hasilnya terbatas pada kasus lokal. Perbaikan hanya sebatas pembersihan dan pengencangan, belum dibandingkan dengan metode lain (misalnya penggantian konektor atau penggunaan material baru). Analisis faktor lingkungan (debu, kelembaban, polusi) hanya disebutkan secara umum, belum diuji secara kuantitatif. Belum ada pemodelan prediktif
---	--	--	---	--

				kisaran 15–25 $\mu\Omega$ (memenuhi standar). Rugi daya turun drastis menjadi $\pm 0,02$ kW $\rightarrow$ energi hilang 72 kWh/jam $\rightarrow$ kerugian biaya Rp 81.720 per jam.	jangka panjang terkait tren kenaikan suhu <i>hotspot</i> pasca perbaikan.
--	--	--	--	--	--

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.20 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dimulainya perbaikan *hotspot*, diperlukan persiapan alat dan perlengkapan yang diperlukan untuk melakukan perbaikan *hotspot*. Pada proses persiapan ini terdiri dari mempersiapkan peralatan yang dibutuhkan. Setelah semua persiapan tersebut, penulis dapat melaksanakan perbaikan *hotspot* pada titik *Clamp* CT tersebut dengan menggunakan alat bantu Sandwich *Clamp*, setelah dilakukan perbaikan tersebut. Penulis dapat melakukan evaluasi dan analisis sehingga mendapatkan kesimpulan.